

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA**

**REVALORIZACIÓN DE RELAVES MINEROS**

Trabajo de Titulación para optar al  
Título de Técnico universitario en  
Minería y Metalurgia

Alumno:

Náyade Eileen Espinoza Acevedo

Profesor Guía:

Ing. Erik Kohnenkamp Nuñez

## **DEDICATORIA**

A Laura Emilia Acevedo Granifo, mi madre, quien siempre me ha brindado su apoyo incondicional y me ha acompañado en el camino de la vida, aconsejándome.

A Pedro Pablo Espinoza Díaz, mi padre, que me ha enseñado a ser perseverante y jamás rendirme a pesar de las circunstancias.

A Emiliano Andrés Pelliza Vassalla, mi novio, el cual ha sido un pilar fundamental en este proceso, acompañándome en las noches de estudio y dando fuerza cuando flaqueaba, muchas gracias por estar siempre preocupado de mí.

A Ignacio Xabier González Díaz, mi amigo, gracias por ser una fuente interminable de ánimo sobre todo en las ocasiones que dude de mi capacidad, por ser mi buscador de internet y siempre llenarme de tutoriales.

Muchas gracias a los cuatro por ser los pilares de este proyecto de vida que elegí y dejarme soñar con la posibilidad de alcanzar los objetivos porque lo que te propones se hace realidad.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a todos los profesores del área de metalurgia, ya que con su conocimiento y apoyo logré generar este proyecto. En especial a Erik Kohenekamp, mi profesor guía el cual se atrevió a recorrer este camino y aceptar este desafío junto a mí.

Al señor José González dueño del relave Ramayana, el cual de forma desinteresada accedió a darme muestras para analizar y nos recibió con amabilidad en su casa.

A Cristóbal Carrasco de SERNAGEOMIN, el cual estuvo siempre dispuesto a contestar mis dudas y apoyarme en la búsqueda de información.

## **RESUMEN**

Este trabajo de título abordo los temas de la utilización de relaves como materia prima para flotación, específicamente los criterios para la evaluación de esta materia prima como fuente mineralógica. La cual presenta características diferentes al mineral utilizado en una minera, ya que este se encuentra conminuido además de presentar compuestos adicionales, puesto que ya ha sido tratado con anterioridad.

El objetivo principal de este trabajo es generar un proceso de refluotación de relaves de cobre, con la finalidad de darle una nueva vida útil a la materia prima utilizada hace más de 10 años, la cual presenta leyes de mineral similares a las que se trabajan actualmente, pero que no necesita ser chancado, ya que su tamaño es menor al que se trabaja dentro de la industria minera.

Para alcanzar el objetivo planteado, se utilizaron criterios de clasificación geotécnica utilizada por la ingeniería civil, como base en la construcción de edificios y carreteras, esto debido a que la materia prima presenta un comportamiento diferente al de una roca madre. También se abordaron parámetros químicos y metalúrgicos, con el fin de conocer la calidad que la materia prima presentaba y si era económicamente atractiva.

Para sustentar el uso de esta materia prima, se desarrollan análisis a las muestras y así determinar de forma práctica que este tipo de mineral es capaz de ser refluotado y tiene condiciones atractivas para el mercado.

Finalmente se plantea una planta virtual considerando los parámetros utilizados por la mediana minería en comparación con los datos levantados y se llega a la conclusión de que esta materia prima no se comporta como un mineral y se deben utilizar equipos alternativos, pero que de todas formas existe la posibilidad de refluotarlo y que con las nuevas tecnologías recomendadas para finos y gruesos se espera una reducción mayor en los costos operacionales.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS.....	2
CAPÍTULO 1: DESSCRIPCIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS, QUÍMICOS Y METALÚRGICOS.....	3
1 IMPORTANCIA DE LA CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN POR MEDIO DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS, QUÍMICOS Y METALURGICOS.....	4
1.1 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	4
1.1.1 Límites de Atterberg.....	4
1.1.1.1 Límite retracción (LC).....	5
1.1.1.2 Límite plástico (LP).....	6
1.1.1.3 Límite líquido (LL).....	7
1.1.2 Sistema de clasificación unificada de suelo (SUCS) .....	8
1.1.3 Licuefacción .....	11
1.1.3.1 Ensayo de penetración estándar (SPT) .....	13
1.1.3.1.1 Correlación por nivel freático .....	14
1.1.3.1.2 Correlación por presión de confinamiento.....	14
1.1.4 Refracción sísmica .....	16
1.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.....	18
1.2.1 Difractometría de polvos.....	19
1.3 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA .....	21
1.3.1 Análisis granulométrico .....	21
1.3.1.1 Porcentaje retenido y retenido acumulado .....	22
1.3.1.2 Porcentaje pasante .....	23
1.3.2 Flotación.....	23
1.3.2.1 Aditivos .....	24
1.3.2.2 Celdas de flotación mecánica .....	24
1.3.2.3 Celda de flotación neumática .....	25
1.3.2.4 Celda columnar.....	26

1.3.2.5	Cinética de flotación.....	26
CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE ACTIVIDADES DE CAMPO Y LABORATORIO		
.....		28
2	CONTEXTO OPERACIONAL Y RESULTADOS DE LAS EXPERIENCIAS DE LABORATORIO .....	29
2.1	CONTEXTO NACIONAL.....	29
2.2	CONTEXTO OPERACIONAL.....	31
2.3	PRUEBAS DE LABORATORIO .....	33
2.3.1	Análisis granulométrico .....	33
2.3.2	Análisis de flotación.....	36
CAPÍTULO 3: RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS Y PROPUESTA ECONÓMICA		
.....		38
3	ANÁLISIS DE DATOS, CÁLCULO DE PARÁMETROS Y PROPUESTA ECONÓMICA.....	39
3.1	ANÁLISIS DE DATOS Y CÁLCULO DE PARÁMETROS.....	39
3.1.1	Caracterización geotécnica.....	39
3.1.2	Caracterización química .....	41
3.1.3	Caracterización metalúrgica .....	42
3.1.4	Cinética de flotación.....	46
3.2	PROPUESTA ECONÓMICA.....	47
3.2.1	Prototipo de planta .....	47
RECOMENDACIONES.....		58
CONCLUSIONES .....		59
BIBLIOGRAFÍA.....		60

## ÍNDICE FIGURA

Figura 1-1: Límite de Atterberg.....	5
Figura 1-2: Set para prueba de contracción.....	5
Figura 1-3: Prueba de plasticidad.....	6
Figura 1-4: Grafica usada para la determinación del límite líquido versus número de golpes. ....	7
Figura 1-5: Prueba en Cuchara de Casagrande. ....	8
Figura 1-6: Carta de plasticidad de Casagrande.....	10
Figura 1-7: Licuefacción de relave minero .....	12
Figura 1-8: Testigos usados en SPT.....	13
Figura 1-9: (A) Factor de correlación CN por Liao y Whitman (1985). (B) Cálculo de correlación CN según tipo de suelo.....	15
Figura 1-10: Medición de ondas elásticas por medio de sismógrafo.....	16
Figura 1-11: Interpretación de datos levantados por geófono.....	17
Figura 1-12: Diagramas de estructuras cristalinas. ....	18
Figura 1-13: (A) Difractómetro de polvo. (B) Difractograma de polvo típico. ....	19
Figura 1-14: Interpretación de incidencia constructiva de electrones según ley de Bragg.....	20
Figura 1-15: Tamizador o Ro-Tap digital. ....	21
Figura 1-16: Tamices. ....	22
Figura 1-17: Celda flotación agitación mecánica.....	25
Figura 1-18: Celda flotación agitación neumática. ....	25
Figura 1-19: Celda columnar.....	26
Figura 1-20: Celda columnar.....	27
Figura 2-1: Mapa distribución de relaves en la comuna de Olmué, región de Valparaíso.....	31
Figura 2-2: Fotografía de relave Ramayana 1.....	32
Figura 2-3: Fotografía de relave Ramayana 2.....	32
Figura 2-4: Fotografía lugar de toma de muestras, Ramayana 2. ....	33
Figura 2-5: Fotografía muestra de mineral pasada por cortador de rifles. ....	34

Figura 2-6: Fotografía tamizador empleado para el análisis granulométrico.....	34
Figura 2-7: Fotografía celda de flotación durante el acondicionamiento de la muestra. .	36
Figura 2-8: Fotografía concentrados a diferentes tiempos de flotación.....	37
Figura 3-1: Flowsheet representativo del sistema operacional a trabajar, la simbología de C1 a C9 es para representar las cintas transportadoras .....	48
Figura 3-2: Diagrama de recuperación de tres minas en comparación del tamaño de partícula.....	55
Figura 3-3: Columna Eriez con sistema de cavitación. ....	56
Figura 3-4: Celda Hydrofloat Eriez.....	57

## ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1-1: Resumen clasificaciones bien gradadas.....	9
Tabla 1-2: Resumen clasificaciones de suelo por SUCS .....	11
Tabla 1-3: Clasificación de compactación según SPT y ángulo de rozamiento interno para suelos granulares. ....	12
Tabla 1-4: Correlaciones para longitud y diámetro de varilla. ....	14
Tabla 2-1: Análisis granulométrico antes de molienda .....	35
Tabla 2-2: Análisis granulométrico después de molienda. ....	35
Tabla 2-3: Resultados obtenidos de la flotación del relave. ....	37
Tabla 3-1: Clasificación en malla #200Ty .....	40
Tabla 3-2: Clasificación en malla #200Ty .....	40
Tabla 3-3: Clasificación en malla #200Ty .....	40
Tabla 3-4: Análisis granulométrico antes de molienda.....	42
Tabla 3-5: Análisis granulométrico después de molienda .....	43
Tabla 3-6: Análisis granulométrico después de molienda .....	47
Tabla 3-7: Especificaciones de chancador primario. ....	49
Tabla 3-8: Especificaciones de chancador secundario.....	50
Tabla 3-9: Especificaciones de chancador terciario. ....	51
Tabla 3-10: Especificaciones de harnero primario.....	52
Tabla 3-11: Especificaciones de harnero secundario. ....	53
Tabla 3-12: Especificaciones de harnero secundario. ....	54

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1: Millones de toneladas de cobre, mineral procesado y relave anuales. ....	30
Gráfico 3-1: Levantamiento de datos de difracción, escala secundaria para cobre. ..	41
Gráfico 3-2: Análisis granulométrico versus %pasante acumulado antes de molienda...	44
Gráfico 3-3: Linealización de análisis granulométrico versus %pasante acumulado antes de molienda.....	44
Gráfico 3-4: Análisis granulométrico versus %pasante acumulado después de molienda.....	45
Gráfico 3-5: Linealización de análisis granulométrico versus %pasante acumulado después de molienda.....	45
Gráfico 3-5: Linealización de análisis granulométrico versus %pasante acumulado después de molienda.....	46

## SIGLA Y SIMBOLOGIA

### SIGLA

2D	:Bidimensional
3D	: Tridimensional.
COCHILCO	: Comisión chilena del cobre
SERNAGEOMIN	: Servicio nacional de minería y geología
LL	: Limite líquido
LP	: Limite plástico
LC	: Límite de contracción
Ip	: Índice de plasticidad
Ipa	: Índice plasticidad correlación A
Ic	: Índice contracción
Cu	: Coeficiente de uniformidad
Cc	: Coeficiente de curvatura
P80	: Mineral pasante del 80%
F80	: Alimentación del 80%
SUCS	: Sistema unificado de clasificación de suelos.
Ty	: Tamices marca Tyler.

## SIMBOLOGÍA

cm	: Centímetro.
m	: Metro.
mm	: Milímetro
µm	: Micrómetro
Kg	: Kilógramo.
g	: Gramo.
ton	: Tonelada
rpm	: Revoluciones por minuto
Hz	: Hertz
l	: Litro
µl	: Microlitro
m <sup>3</sup>	: Metro cúbico
Mo	: Molibdeno.
Cu	: Cobre.
Au	: Oro.
Ag	: Plata
U	: Uranio
SiO <sub>2</sub>	: Sílice
G	: Grava.
S	: Arena
C	: Arcilla
M	: Limos
O	: Orgánicos
F	: Finos
W	: Bien gradada
P	: Mal gradada
hr	: Hora
kW	: Kilo Watts

## INTRODUCCIÓN

Chile, es por naturaleza uno de los países más ricos en recursos naturales renovables a largo plazo, esto gracias a la actividad volcánica y sísmica que se dio hace miles de años, por lo que se han desarrollado mega, medianos y pequeños proyectos para la extracción de cobre y así ser un gran proveedor mundial de este y otros minerales.

Según datos de COCHILCO, se estiman 696 relaves en calidad de abandono, además entre el año 2003 y 2020, la actividad minera aumento en un 18% y se espera que para el 2031, sea de un 30%, sumando a esto que las leyes de mineral han bajado de un auspicioso 3%, hasta incluso en ocasiones a un 0,6%, aunque se trabaja con una estimación promedio del 1,3%. Asimismo, el procesamiento de sulfuros de cobre se considera del 50% de la producción nacional y de esta cantidad el 44% corresponde a relaves mineros, siendo el año 2020, cerca de 85.000 millones de toneladas, sólo de relaves.

La actividad minera es fundamental para la economía nacional y no se busca estigmatizar a esta fuente de recursos económicos, la cual no sólo da empleabilidad al país, si no que aporta en tecnología y avance al desarrollo, pero es necesario hacer más.

Hoy, se utilizan relaves mineros, tanto para aumentar la ley de los minerales que actualmente son tratados, ya que se encuentran leyes más altas; en empresas como CAP minería, con el proyecto “hierro atacama fase 1”, el cual procesa hierro de relaves, llegando a una ley del 14%; continuando hay estudios de la universidad Andrés Bello para generar geo-polímeros a partir de relaves, en Perú se encuentran ladrillos y baldosas a partir de los mismos.

El propósito de este trabajo de título es plantear la posibilidad de trabajar con relaves mineros que lleven más de 30 años en calidad de abandono y generar las directrices de las cuales se podría abordar la remoción y retratado de este mineral.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Generar un proceso de refluación y recuperación de metales que se encuentren en relaves abandonados hace más de 10 años; con el propósito de encontrar nuevas fuentes de extracción.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Caracterizar el relave a partir de un análisis químico, metalúrgico y mecánico; con el fin de evaluar su potencial para la reutilización.
2. Determinar el contexto actual y las características del relave, mediante estudios; obteniendo una propuesta operacional para el mineral.
3. Elaborar una propuesta técnica y económica para la utilización del mineral proveniente del relave, analizando sus particularidades para la confección de una propuesta de conminución y flotación.

**CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS,  
QUÍMICOS Y METALÚRGICOS.**

# **1 IMPORTANCIA DE LA CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN POR MEDIO DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS, QUÍMICOS Y METALÚRGICOS.**

Las caracterizaciones son de vital importancia al momento de evaluar si es viable trabajar un mineral, ya sea directamente de una mina o en este caso de un relave. Es en pos de cuantificar y calificar el recurso que se tiene a modo de trazar la viabilidad tanto de extracción, manipulación y su valor económico, por ello, se describirán técnicas de suelo, clasificaciones metalúrgicas y análisis químicos que se deben realizar previamente.

## **1.1 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA**

Geotecnia, también conocida como la mecánica de suelos, es una ciencia que deriva de la geología y geofísica, la cual se basa en dos pilares, la mecánica y la hidráulica. Esta ciencia permite evitar el hundimiento, derrumbe y desplazamientos de tierra.

“La mecánica de suelos es la rama de la ciencia que trata el estudio de sus propiedades físicas el comportamiento de las masas de suelos sometidas a varios tipos de fuerzas.”

(Das, 1999)

En base a lo anteriormente mencionado, es que un relave abandonado, como parte de la corteza terrestre, ya que su tiempo de cimentación lo hace propio del lugar en el que se encuentra.

### **1.1.1 Límites de Atterberg**

La consistencia de suelo fue estudiada en el siglo XX, por un científico sueco llamado Albert Mauritz Atterberg, el cual planteó que un suelo se comporta como un sólido frágil cuando no contiene agua, mientras que cuando se aumenta el contenido de agua este pasa a ser semisólido, plástico o líquido (Ver figura 1-1). Para cada cambio de clasificación, Atterberg definió un límite asociado al paso de un estado a otro siendo

contracción, plástico y líquido respectivamente y para realizar estos estudios se considera material bajo la malla #40 Ty.

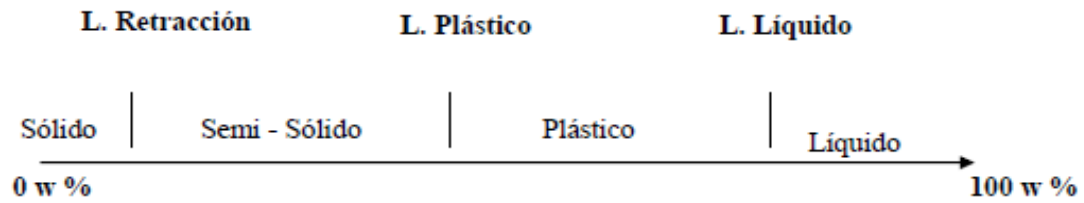


Figura 1-1: Límite de Atterberg.

Fuente. Universidad politécnica de Cataluña.

#### 1.1.1.1 Límite retracción (LC)

El paso de consistencia sólida a semisólida o viceversa, se conoce como límite de retracción o contracción, su nombre se debe a que cuando la muestra de suelo pierde el agua que posee, esta se contrae, ocupando un menor volumen. Las pruebas dentro del laboratorio se realizan en un recipiente de porcelana, para que este no se deforme (Ver figura 1-2).



Figura 1-2: Set para prueba de contracción.

Fuente. TEST MAK

Una vez realizada la experiencia los datos son recopilados y llevados a la siguiente ecuación:

$$LC = W_i(\%) - \Delta W(\%) \leftrightarrow LC = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) * 100 - \left[ \frac{(V_i - V_s) * \rho_a}{m_2} \right] * 100$$

donde,  $m_1$ = masa inicial, suelo húmedo [g]

$m_2$ = masa final, suelo seco [g]

$V_i$ = volumen inicial, suelo húmedo [cm<sup>3</sup>]

$V_s$ = volumen final, suelo seco [cm<sup>3</sup>]

$\rho_a$ = densidad del agua [g/cm<sup>3</sup>]

#### 1.1.1.2 Límite plástico (LP)

Se considera límite plástico al paso de suelo plástico a semisólido, en esta instancia, se incorpora agua manualmente a la porción de suelo que se está analizando. Para medir el límite plástico se forman cilindros de 3,2[mm] sobre una placa de vidrio (Ver figura 1-3) y el experimento termina cuando hay degradación de la sustancia, es decir, cuando comiencen a observarse grietas y no se forme una especie de plastilina.

De este experimento se obtiene el índice de plasticidad (PI), el cual está dado por:

$$PI = LL - LP$$

donde, LL= límite líquido

LP= límite plástico



Figura 1-3: Prueba de plasticidad.

Fuente. Fundamentos de la ingeniería geotécnica, Braja M. Das.





Figura 1-5: Prueba en Cuchara de Casagrande.

Fuente. Estudios geotécnicos.

Además, es necesario calcular el índice de plasticidad y de contracción, mediante:

$$IP = LL - LP$$

$$IC = LP - LC$$

donde,    IP= índice plástico  
          IC= índice contracción  
          LL= límite líquido  
          LP= límite plástico  
          LC= límite contracción

### 1.1.2 Sistema de clasificación unificada de suelo (SUCS)

Los suelos tienen propiedades y cada uno de ellos un comportamiento según sus características de resistencia al agua, pero para poder hablar un lenguaje común es que se desarrolló la clasificación de suelos, es así como nacen las siglas con las que se puede determinar qué tipo de suelo es mediante los parámetros expuestos en los límites de Atterberg, adicionalmente a estos las contribuciones de Casagrande y Hazen.

Originalmente este sistema fue diseñado por Casagrande (1942) para realizar aeropuertos durante la guerra, es decir, la factibilidad de construir aeropuertos militares donde fuese inusual su construcción.

Este método distingue cinco clasificaciones generales para los suelos que son: gravas (G), arenas (S), arcillas (C), limos (M) y orgánicos (O) y subclasificaciones según si está bien gradada (W) o mal gradada (P), también si es de alta compresibilidad (H) o baja compresibilidad (L). (Ver tablas 1-1 y 1-2).

Para realizar la categorización, es necesario realizar un análisis granulométrico a la muestra, donde los tamices fundamentales para la clasificación son el #4Ty y #200Ty, aunque se pueden usar niveles intermedios.

Suelo grueso, si el porcentaje sobre malla #200Ty es mayor al porcentaje bajo este tamiz, se considera un suelo grava o arena y para darle la clasificación de bien o mal gradada, se utilizan los indicadores de Allen Hazen.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

donde, Cu= coeficiente uniformidad  
 D60= diámetro partículas 60% pasante  
 D10= diámetro partículas 10% pasante

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}}$$

donde, Cc= coeficiente curvatura  
 D60= diámetro partículas 60% pasante  
 D10= diámetro partículas 10% pasante  
 D30= diámetro partículas 30% pasante

Tabla 1-1: Resumen clasificaciones bien gradadas

Bien Gradadas (W)		
Tipo	Coeficiente uniformidad	Coeficiente curvatura
Gravas	Cu>4	1≤Cc≤3
Arenas	Cu>6	

Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos de Fundamentos de la ingeniería geotécnica, Braja M.

Das.

Suelos finos, cuando el porcentaje bajo la malla #200Ty es mayor al porcentaje sobre este tamiz, es considerado un suelo de arcillas o limos y para determinar su plasticidad o compresibilidad es que se ha desarrollado la carta de plasticidad, diseñada por Casagrande (1932). Donde se traza una línea vertical cuando el límite líquido es 50% y se compara con la línea de índice plástico A (Ipa) y U (Ipu), la cual está determinada de forma empírica por:

$$Ipa = 0,73 * (LL - 0,2)$$

$$Ipu = 0,9 * (LL - 8)$$

Ambas expresiones empíricas son determinadas usando el límite líquido como referencia, estas curvas son líneas rectas crecientes las cuales se interceptan con la vertical del 50%LL y se leen en la carta de plasticidad (Ver figura 1-6).

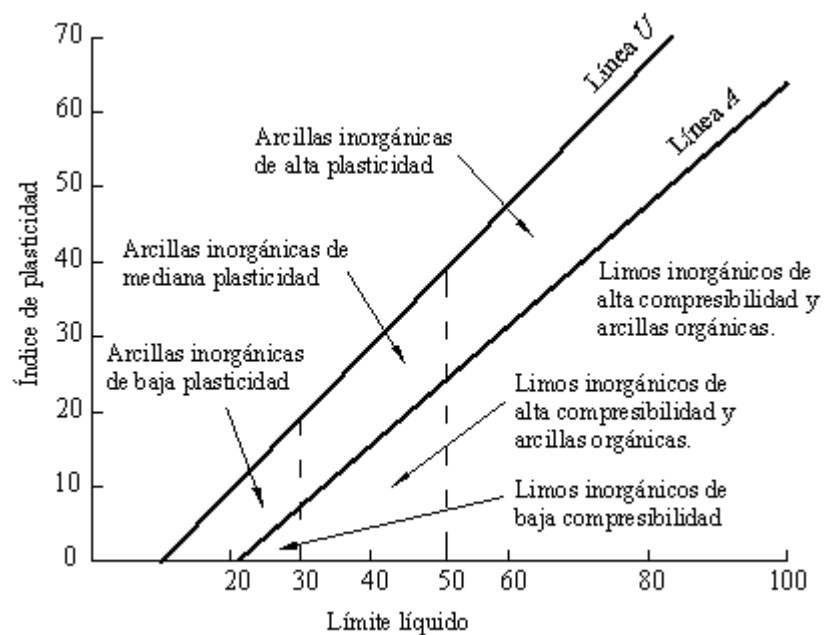


Figura 1-6: Carta de plasticidad de Casagrande.

Fuente. Diccionario geotecnia online.

Tabla 1-2: Resumen clasificaciones de suelo por SUCS

Suelo	Malla #200 Ty	Malla #4Ty	%Fino	Coefficiente de Allen Hazen
	Grueso $\%(G+S) > \% F$	Grava $\%G > \%S$	Arena $\%G < \%S$	$\%F < 5\%$
$5\% \leq \%F < 12\%$				SW o SP
			$\%F \geq 12\%$	G(W,P) o G(C,M)
				S(W,P) o S(C,M)
GC o GM				
SC o SM				
Fino $\%(G+S) < \%F$	<b>Ipa</b>	<b>LL</b>	<b>Carta plasticidad</b>	
	C > rango sobre recta Ipa	LL > 50% Alta compresibilidad (H)	CH o CL	
	M < rango bajo recta Ipa	LL < 50% Baja compresibilidad (L)	MH o ML	

Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos de Fundamentos de la ingeniería geotécnica.

### 1.1.3 Licuefacción

La licuefacción es la tendencia a disminuir el volumen del suelo durante esfuerzos de corte, esto es producido por el aumento de la presión del agua intersticial entre las rocas, la cual incrementa la presión hacia las rocas haciendo que disminuya la fuerza de contacto entre las partículas. Lo anteriormente mencionado produce una inestabilidad en el suelo, haciendo que cambie de un estado sólido a un estado semiplástico, similar a la arena movediza.

“La transformación de un material granular de un estado sólido a un estado licuado como consecuencia de la presión de agua de poros” (Youd, 2001)

Los criterios que influyen en la licuefacción son la intensidad, magnitud y duración de los sismos o de movimientos que afecten al agua freática, la tensión vertical total y efectiva de los poros, las características del suelo según Ensayo de penetración estándar (STP) y la granulometría de los suelos.

Los estudios determinan que existirá licuefacción si  $C_u \geq 2$ , además que la densidad de suelo este entre el 30-60% y que el NSPT se encuentre entre 0-25 golpes (Ver tabla 1-3).

Tabla 1-3: Clasificación de compactación según SPT y ángulo de rozamiento interno para suelos granulares.

<b>Compactación</b>	<b>NPST</b>	<b><math>\Phi^\circ</math></b>
Muy alta	<4	28
Suelta	4 a 10	28 a 30
Medianamente compacta	10 a 30	30 a 36
Compacta	30 a 50	36 a 41
Muy compacta	>50	>41

Fuente. Clasificación de Skempton (1986) sobre de la compacidad de los terrenos granulares en función del SPT



Figura 1-7: Licuefacción de relave minero

Fuente. Empresa Minería circular.

### 1.1.3.1 Ensayo de penetración estándar (SPT)

La realización de este ensayo consiste en introducir un testigo en el suelo del cual se desea conocer su consistencia, este es de acero hueco o con punta ciega (Ver figura 1-8), el cual debe introducirse 60[cm] en total y se cuentan la cantidad de golpes efectuados cada 15[cm] de hundimiento. Para realizar el hundimiento en la punta opuesta al suelo se le pega con una masa de 63,5[Kg] a una altura de 76,2[cm].



Figura 1-8: Testigos usados en SPT.

Fuente. Empresa MGS.

El número de golpes efectuados para el hundimiento de 30[cm] de este tubo, se conoce como NSPT o N30 y permite establecer una correlación de los parámetros conocidos como resistencia o deformación del material. Esta estimación permite conocer el ángulo de rozamiento interno, el módulo de deformación, la resistencia de corte no drenada y la densidad relativa del suelo en cuestión.

Una vez realizado el ensayo es necesario es necesario realizar correlaciones a la cantidad de golpes tomados, ya que múltiples factores influyen en la correcta medición, ejemplo de esto son la preparación y calidad del sondeo, longitud y diámetro de la varilla, pandeo del varillaje, dispositivo de golpeo, por nivel freático y por presión de confinamiento (Ver tabla 1-4).

Tabla 1-4: Correlaciones para longitud y diámetro de varilla.

Longitud varilla [m]	Factor correlación	Diámetro sondeo [mm]	Factor correlación
>10	1,00	65 a 115	1,00
6 a 10	0,95	150	1,05
4 a 6	0,85	200	1,15
3 a 4	0,75		

Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos de Ensayos geotécnicos in situ.

#### 1.1.3.1.1 Correlación por nivel freático

Los suelos que se deben analizar y corregir, son suelos de arena fina y limos, los cuales por su disgregación presentan una mayor filtración de agua, haciendo que los depósitos de agua freática en niveles superiores o medios de la estructura. Para realizar esta medición el testigo debe contener agua para asemejar las condiciones del suelo y disminuir el error.

La corrección la plantea Terzagui y Peck, cuando el NSPT > 15, esto debido a que las presiones intersticiales aumentan al momento del golpeo, por medio de:

$$N = 15 + \frac{NSPT - 15}{2}$$

#### 1.1.3.1.2 Correlación por presión de confinamiento

La presión de confinamiento se define como la sobrecarga por el peso de las tierras que están sobre el lugar que se está midiendo, además de esto para obtener una

correcta clasificación se deben tomar medidas a diferentes alturas, entonces para unificar todas las mediciones realizadas se hace una corrección referida al valor unitario de la presión vertical ( $\sigma'_{v0} = 1 [\text{kp/cm}^2]$ ), la ecuación utilizada es:

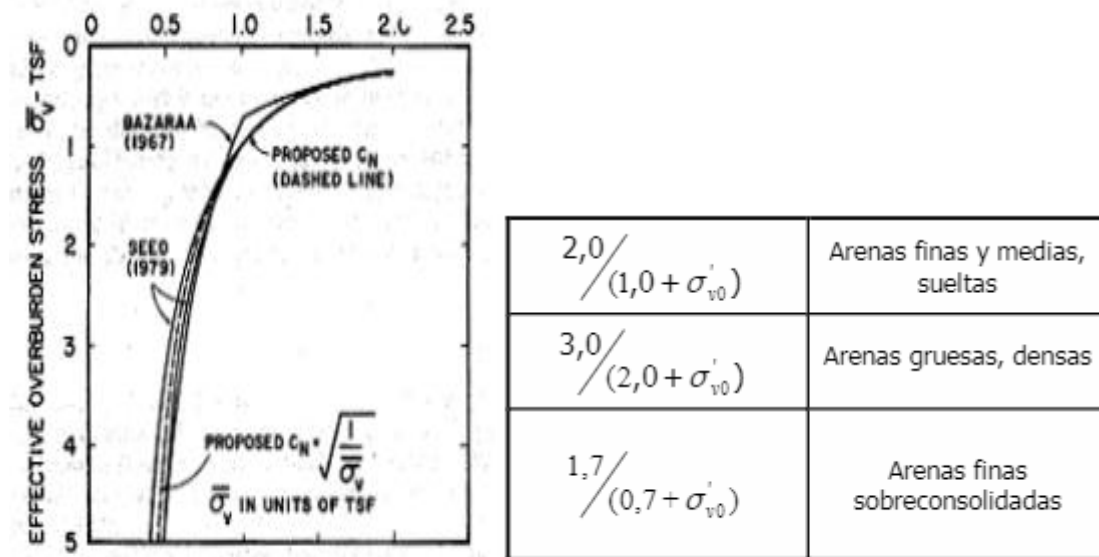
$$N = CN * NPST$$

donde, CN= coeficiente correlación

$$CN = \frac{1}{\sigma'_{v0}{}^n}$$

donde, n= constante valorada en 0,56

$\sigma'_{v0}$ = ver figura 1-9 (A) y (B)



(A)

(B)

Figura 1-9: (A) Factor de correlación CN por Liao y Whitman (1985). (B) Cálculo de correlación CN según tipo de suelo.

Fuente. Ensayo geotécnicos in situ por Marcelo Devincenzi y Norberto Frank

#### 1.1.4 Refracción sísmica

La refracción sísmica es un tipo de análisis de vibración que se hacen a los subsuelos para determinar las condiciones y competencia de la roca, así como las fallas geológicas.

Por medio de un sismógrafo y geófonos, se miden el tiempo de propagación de las ondas P y S. Los geófonos son puestos en línea con un partidor de onda (martillo) el cual es golpeado y comienza la medición de las ondas elásticas. Los geófonos son capaces de medir las ondas refractadas a una profundidad entre 30 y 50 [m], a través de los cables de datos las velocidades de onda se almacenan en el sismógrafo para ser interpretados (Ver figura 1-10).

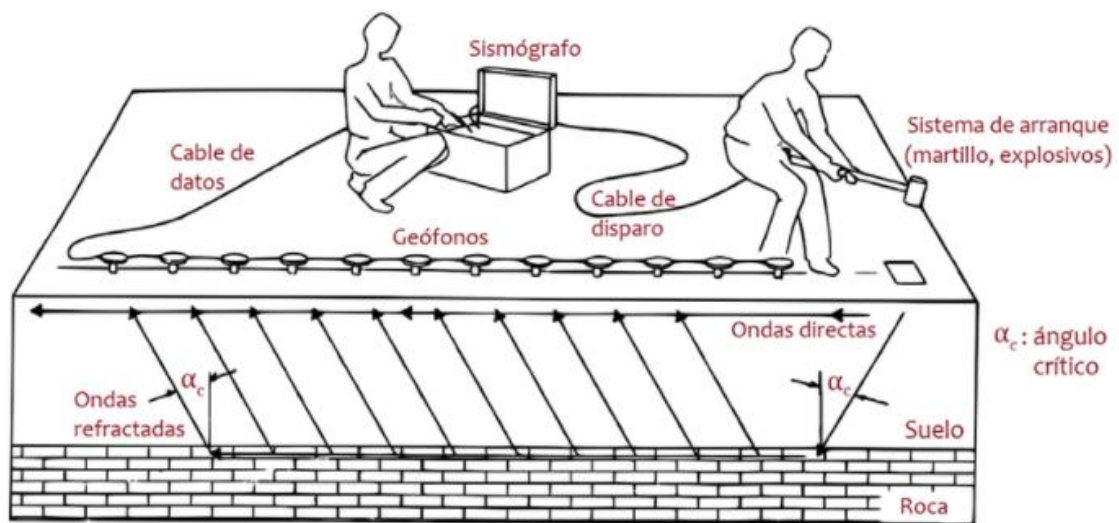


Figura 1-10: Medición de ondas elásticas por medio de sismógrafo.

Fuente. Geodatos.

Una vez recopilado los datos, estos son interpretados por medio de programas computacionales donde se realizan gráficos con los datos levantados, para posteriormente formar proyecciones 2D y 3D del subsuelo (Ver figura 1-11). Esto permite tener una proyección del subsuelo sin tener que verlo en forma directa y pudiendo llegar a lugares de difícil acceso o de amplia altura, lo que imposibilita levantar datos visuales.

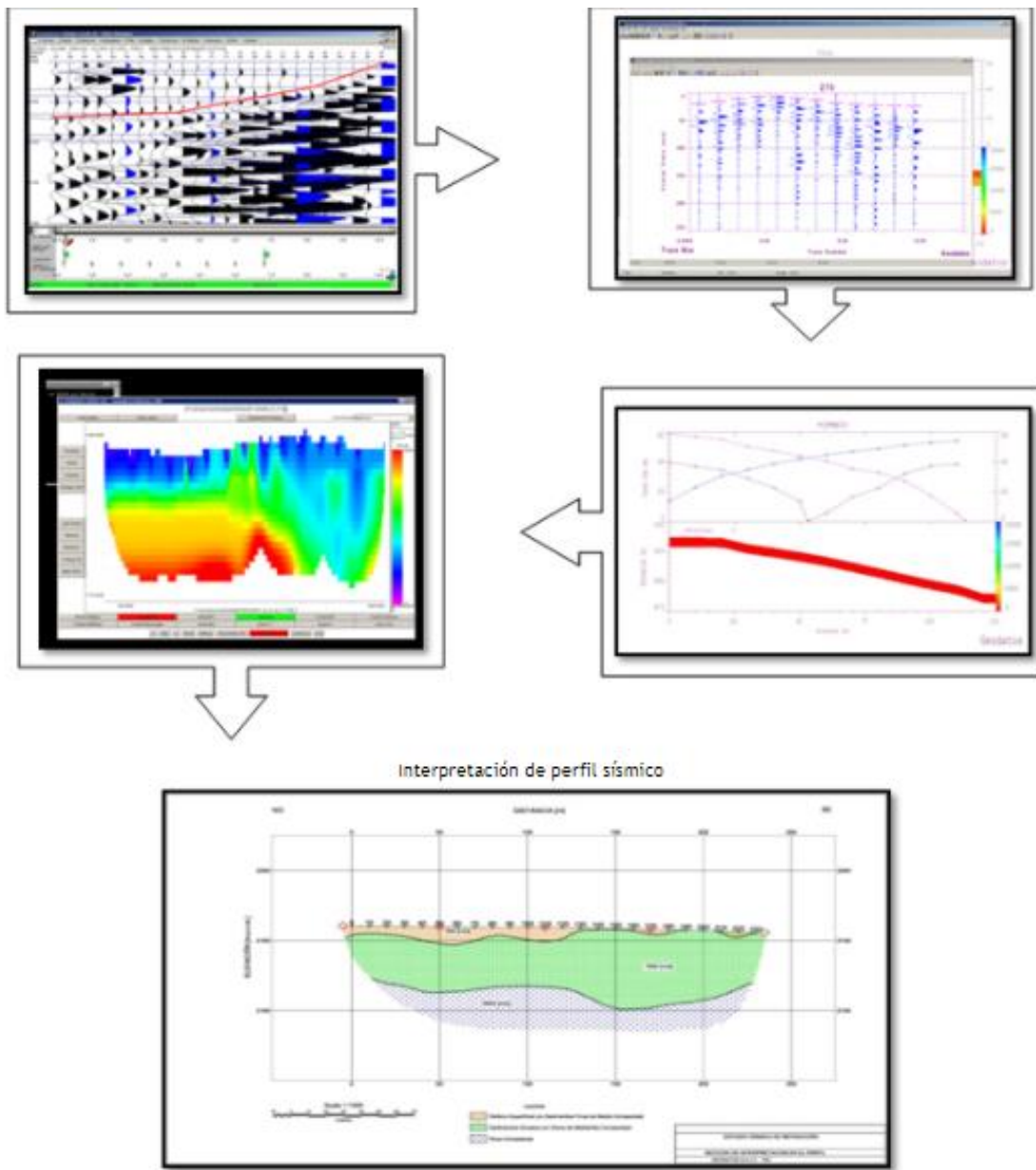


Figura 1-11: Interpretación de datos levantados por geófono.

Fuente. Geodatos.

## 1.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

La caracterización química se realiza para la determinación de compuestos cristalinos dentro de un material que no ha sido clasificado, en ocasiones es posible tener muestras puras, pudiendo orientar los cristales y así trabajar con su estructura cristalina (Ver figura 1-12), pero en ocasiones esto no es posible debido a que las muestras no se encuentran de forma aislada y se debe realizar una difracción de polvos; la cual puede ser a través de rayos X, haz de electrones o haz de neutrones.

Dependiendo del agente refractado que se utilice es en que parte del átomo se va a generar la interferencia, pudiendo ser en los electrones del último nivel de energía o bien en el núcleo del átomo. Aunque todos los métodos se basan en el mismo principio, el haz de neutrones se hace más preciso ya que es capaz de trabajar, aunque se modifique la temperatura y la presión de los polvos, por lo que es capaz de sobrellevar el apantallamiento por isomorfismo.

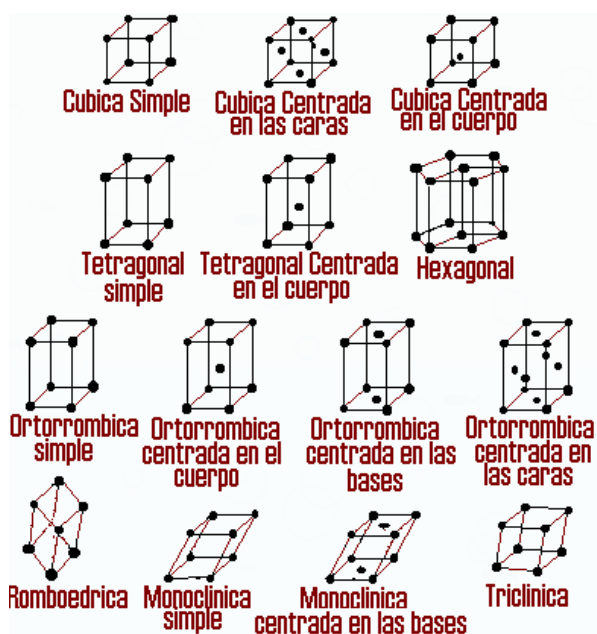


Figura 1-12: Diagramas de estructuras cristalinas.

Fuente. Química del estado sólido.

### 1.2.1 Difractometría de polvos

La difracción de polvos, consiste en bombardear con ondas una muestra de mineral, de la cual no se conocen sus componentes con el fin de determinar cuáles de ellos están presentes para realizar esto se utiliza un difractómetro de polvos (Ver figura 1-12A), el cual emite un haz de electrones, neutrones o rayos X, los cuales inciden en las caras del cuerpo cristalino sin orientar, estos rayos chocan con los átomos orientados en las celdas y son refractados generando un difractograma intensidades (Ver figura 1-12B).

Una vez obtenidos los resultados de la difracción, estos se comparan por medio de un programa computacional donde se almacenan múltiples espectros realizados a los elementos puros y así lograr determinar que compuesto se solapa con la base de datos para finalmente entregar un resultado.

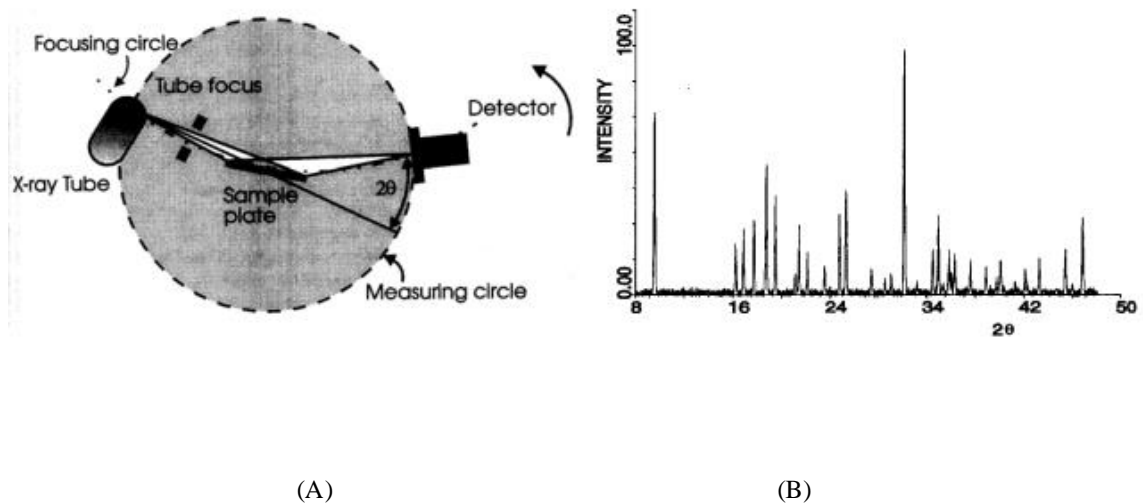


Figura 1-13: (A) Difractómetro de polvo. (B) Difractograma de polvo típico.

Fuente. Aplicación de química inorgánica, Universidad de Málaga.

Para obtener una interferencia constructiva se debe cumplir la ley de Bragg, la cual plantea que debe haber una interferencia constructiva, la sumatoria de la diferencia del recorrido de ambas ondas tiene que ser un número múltiplo de la longitud de onda y el

ángulo de incidencia y el refractado deben ser iguales para que las amplitudes sean aditivas y no nulas (Ver figura 1-13).

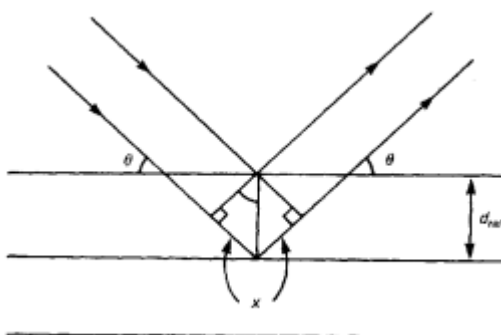


Figura 1-14: Interpretación de incidencia constructiva de electrones según ley de Bragg.

Fuente. Aplicación de química inorgánica, Universidad de Málaga.

Cuando se realiza una difracción de polvos, puede existir apantallamiento de los minerales existentes, debido a que estos no se pueden orientar, produciendo un solapamiento de información, donde no es posible diferenciar compuestos isómeros.

Si bien estas técnicas dan una clara observación de los elementos y compuestos que pueden estar presentes en las muestras y más específicamente en los minerales, no es suficiente conocer la composición, sino también es imperioso conocer los mecanismos para poder extraer y recuperar los minerales de interés.

### 1.3 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA

Metalurgia es un conjunto de técnicas que se realizan para extraer metales contenidos en rocas por medio de diversos procesos, pero para realizar ese proceso es necesario conocer las características del mineral a trabajar, como la dureza, la ley, razón de reducción, dureza, etc. Para realizar lo anteriormente mencionado es que se requiere realizar múltiples pruebas y determinar las particularidades del mineral que entra al proceso.

#### 1.3.1 Análisis granulométrico

La determinación de los tamaños de las rocas a trabajar es fundamental a la hora de realizar los procesos de conminución y el diseño de la planta, por lo que se hace necesario realizar un análisis granulométrico la muestra a trabajar, además de llevar un control de los procesos.

Para realizar el análisis granulométrico se emplea un equipo denominado Ro-Tap (Ver figura 1-15), el cual emplea tamices de diferentes aberturas (Ver figura 1-16), también denominados mallas. La muestra es puesta en el tamiz de mayor abertura el cual se ubica en la parte superior y hacia abajo se ubican tamices de aberturas menores, el último de ellos se denomina fondo y este es completamente cerrado.



Figura 1-15: Tamizador o Ro-Tap digital.

Fuente. Empresa DINLA.



Figura 1-16: Tamices.

Fuente. Empresa TESATEST.

El mineral, al ingresar al tamizador será sometido a vibración con amplitud de onda variable según el requerimiento y el tiempo de tamizado también dependerá de la cantidad de mineral y el operador. Una vez terminado el tiempo, el set de tamices es sacado del tamizador y es masado, para conocer la cantidad de mineral que está en la malla, se debe restar la masa de esta. El mineral que no cumpla con el tamaño de abertura de la malla quedará retenido en esta, pasando a denominarse sobre tamaño, mientras que el que cumpla con la abertura pasará, siendo considerado bajo tamaño.

#### 1.3.1.1 Porcentaje retenido y retenido acumulado

El porcentaje retenido es la cantidad de muestra que queda sobre el tamiz, mientras que el retenido acumulado es la cantidad que queda sobre los tamices, es decir, el primero es específico para una abertura, mientras que el otro es para una cantidad mayor de muestra, generalmente se usa cuando se solicita una malla de corte y todo lo que está sobre ella generará el acumulado. Su determinación matemática es:

$$\% \text{ retenido} = \frac{Mm_1}{Mt}$$

donde,  $Mm_1$  = masa mineral de un tamiz

$Mt$  = masa total de mineral ingresada al tamizador.

$$\%retenido_{acumulado} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{mi}}{Mt}$$

donde,  $Mm_i$ = masa mineral de cada tamiz hasta la malla de corte.

$n$ = número de tamices seleccionados.

$Mt$ = masa total de mineral ingresada al tamizador.

### 1.3.1.2 Porcentaje pasante

Cantidad de mineral que pasa el tamiz, se evalúa desde el primer tamiz, el de mayor abertura, hacia abajo. Este porcentaje ayudará a encontrar el P80, que corresponde el diámetro de la partícula que corresponde al 80% del mineral que atraviesa los tamices.

$$\% pasante_{n+1} = \%pasante_n - \%retenido_n$$

donde,  $\%pasante_n$ = comienza en 100% y luego se usa el del nivel anterior

$\%retenido_n$ = masa mineral retenida del nivel que se desea calcular.

Una vez realizado estos cálculos, es posible calcular el P80, el cual se hace por medio de una regresión lineal, el P80, es el 80% del mineral pasante.

### 1.3.2 Flotación

La flotación es un proceso fisicoquímico para concentrar y separar minerales, principalmente sulfuros. El mineral luego de ser conminuido y clasificado, ingresa al proceso de flotación, donde se hace una pulpa mineral (que contenga entre un 25%-35% de sólidos), agua y aditivos.

La mayor cantidad de trabajo mecánico que puede obtenerse a partir de una cantidad dada de sustancia determina el estado inicial dado, sin aumentar su volumen total o permitir que el calor pase hacia o desde cuerpos externos, excepto que al final de los procesos son dejados en su condición inicial. (Gibbs, 1873)

### 1.3.2.1 Aditivos

Los aditivos que se utilizan en la flotación tienen como principal objetivo entregar características especiales al mineral, ya sea al mineral de interés, como al mineral de descarte. Estos aditivos son agentes químicos que interactúan con la superficie del mineral, entregándole propiedades aerofílicas e hidrofóbicas a la sustancia que se flota, mientras que a la que sale por la cola, le entrega propiedades aerofóbicas e hidrofílicas. Algunos de los aditivos que son conocidos como modificadores, entregan propiedades a la pulpa mineral, dándole condiciones a esta para propiciar la interacción del mineral con los demás aditivos.

- Colectores: cambian la superficie del mineral, modificación química, entregándole propiedades hidrofóbicas y aerofílicas.
- Espumantes: brindan una burbuja estable, donde el mineral de interés se adhiere por su aerofilidad, esta burbuja asciende a la superficie y se destruye al momento de caer del rebalse.
- Depresores: cambian la superficie química de los minerales, entregándoles propiedades hidrofílicas y aerofóbicas.
- Modificadores: condiciones a la pulpa, como la variación del pH, debido a que hay elementos que reaccionan mejor con cierta acidez o basicidad.

### 1.3.2.2 Celdas de flotación mecánica

La celda de flotación tiene como función propiciar la separación del mineral, por medio de un sistema rotor-estator, el cual permita mantener la pulpa en movimiento para que no precipite y mantener el contacto con el aire inyectado (Ver figura 1-17).

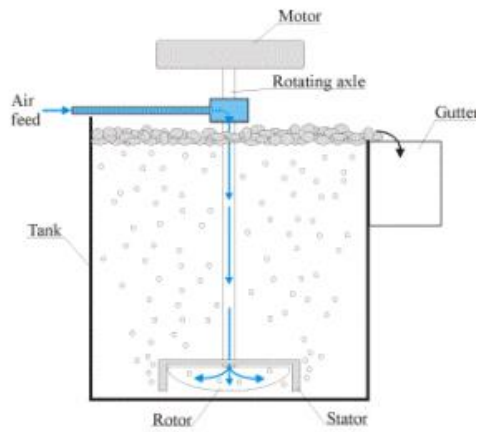


Figura 1-17: Celda flotación agitación mecánica.

Fuente. Memoria de Rodrigo García, Universidad de Chile.

### 1.3.2.3 Celda de flotación neumática

La celda de flotación neumática es una adaptación de la mecánica, pero esta posee una inyección de aire a través de una tubería directamente al interior de la celda (Ver figura 1-18).

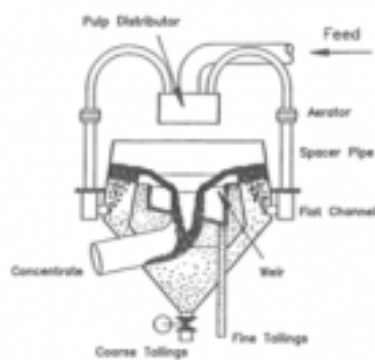


Figura 1-18: Celda flotación agitación neumática.

Fuente. Empírica consultores.

#### 1.3.2.4 Celda columnar

A diferencia de las celdas anteriormente mencionadas, esta celda además del aire utiliza la gravedad para realizar la separación de los minerales. En este caso la celda tiene una altura mayor a las otras y el mineral es ingresado a 1/3 de la altura de la columna desde la parte inferior (Ver figura 1-19).

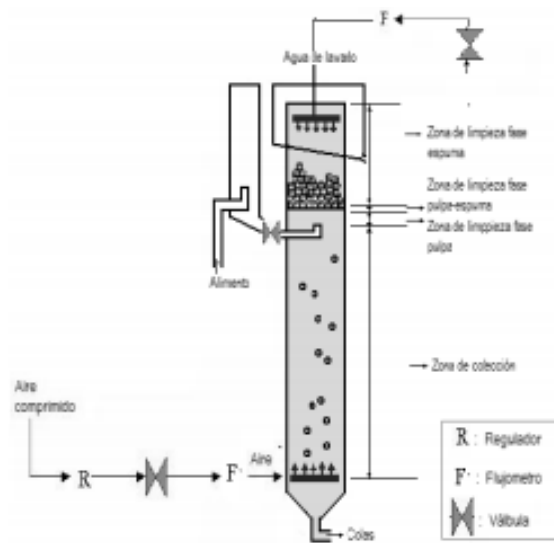


Figura 1-19: Celda columnar.

Fuente. Flotación en columna para partículas finas de Giovanna Suarez, Efraín García y Juan Amariz.

#### 1.3.2.5 Cinética de flotación

La cinética de flotación mide la concentración de mineral a medida que pasa el tiempo de residencia en del mineral en la celda de flotación. Esto es el principio para diseñar los sistemas de flotación y el dimensionamiento de la planta de flotación.

Es necesario realizar esto para determinar el tiempo óptimo de residencia, ya que la curva se genera a partir del mineral flotado (Ver figura 1-20).

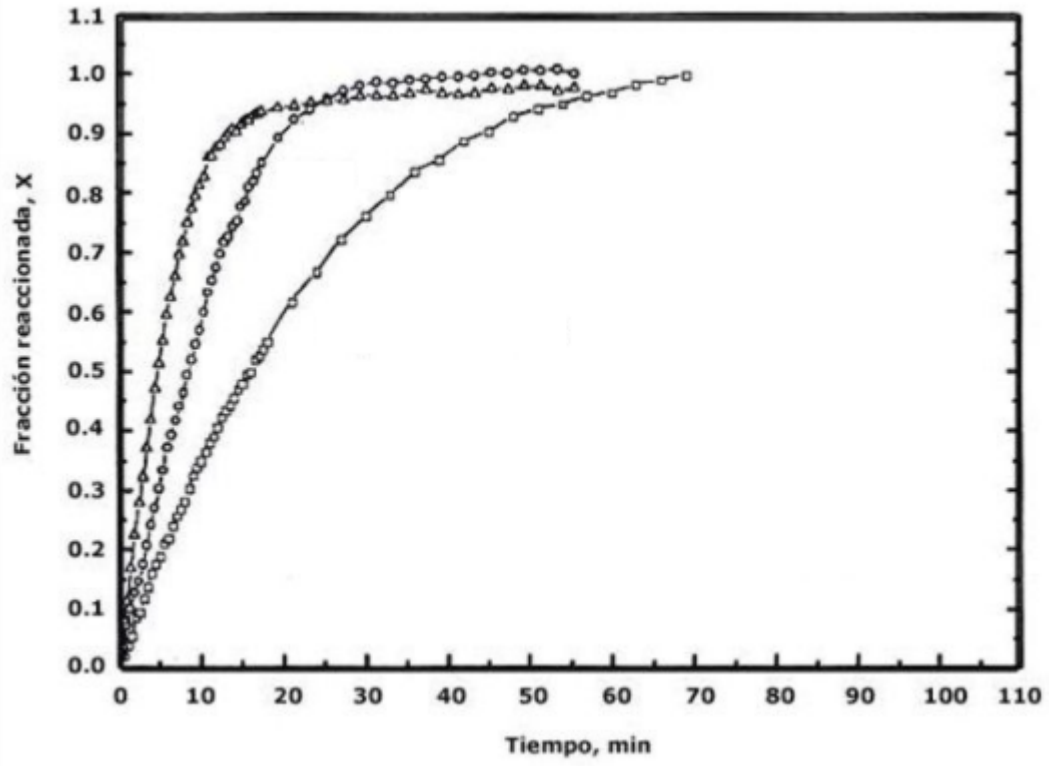


Figura 1-20: Celda columnar.

Fuente. Cinética de flotación de Héctor Bueno.

**CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE ACTIVIDADES DE CAMPO Y**  
**LABORATORIO**

## **2 CONTEXTO OPERACIONAL Y RESULTADOS DE LAS EXPERIENCIAS DE LABORATORIO**

Relave, es el residuo que deja la flotación de minerales sulfurados, este residuo se deposita en cuencas o zonas adaptadas para su recepción. El relave contiene material valioso que no fue flotado, agua del proceso y compuestos químicos que se ocuparon durante el mecanismo de selección.

### **2.1 CONTEXTO NACIONAL**

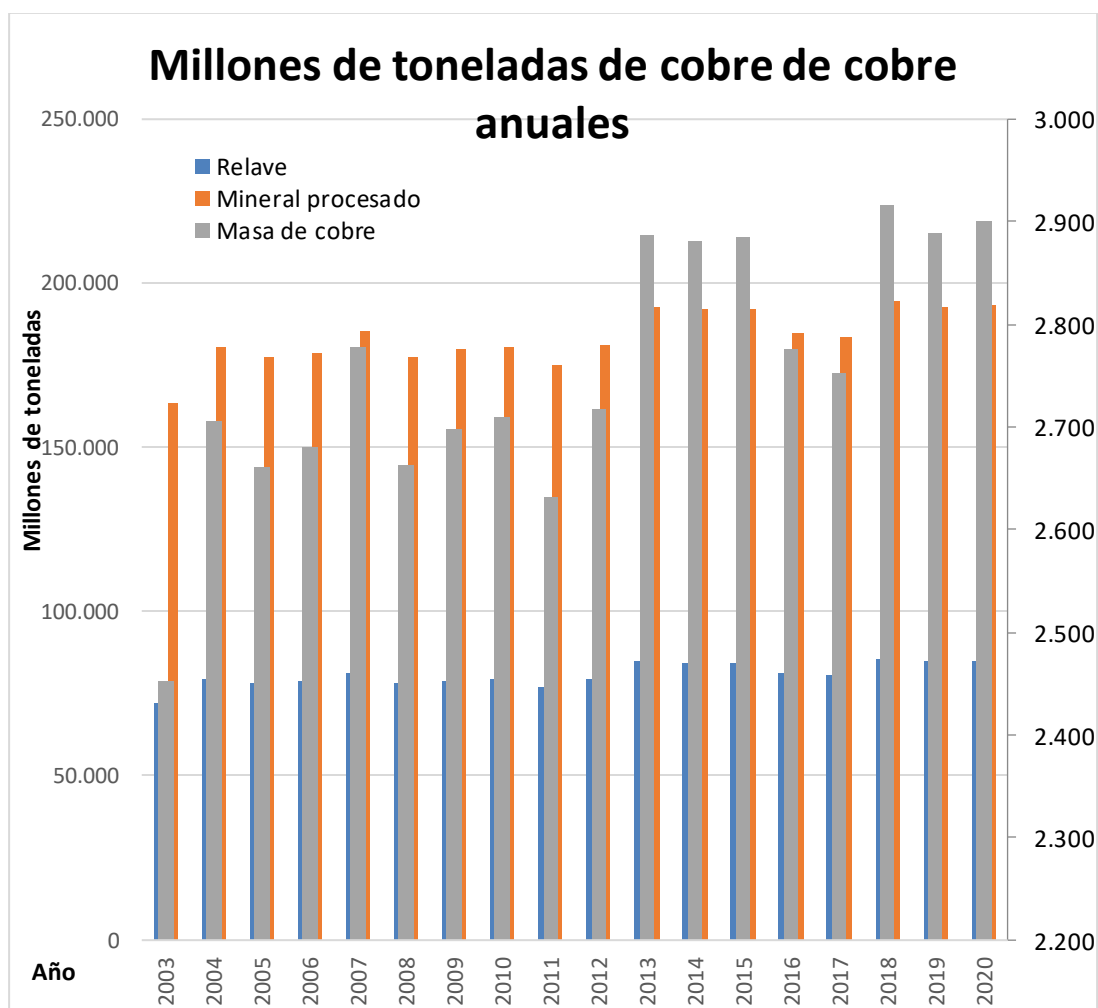
Los relaves se generaron de forma indiscriminada hasta el año 2007, donde fue creada el artículo 495 de la ley medioambiental, aunque posteriormente en el año 2011 fue creado del ministerio de medio ambiente en Chile. Algunos de los puntos de la ley están expuestos a continuación.

- Desmantelamiento de instalaciones
- Secado de lagunas de aguas claras
- Mantenimiento de canales permeables
- Evacuación aguas lluvias
- Cierre de accesos
- Recubrimiento de cubeta y taludes
- Estabilización de taludes
- Habilitación de vertederos de emergencia
- Cercado de torres colectoras
- Instalación de cortavientos
- Compactación de berma de coronación
- Piscinas de emergencia
- Construcción muro protección pie de talud

Antes de los años mencionados anteriormente, los relaves generados por la minería no tenían ningún tipo de regulación, aunque en la actualidad son considerados un pasivo medioambiental, lo que implica que no genera ningún tipo de riesgo para la salud o el entorno.

COCHILCO, dentro de su catastro nacional, menciona los miles de millones de toneladas de mineral procesado, relave generado y cobre producido anualmente, como consecuencia de las faenas de sulfuros de cobre (Ver gráfico 2-1).

Gráfico 2-1: Millones de toneladas de cobre, mineral procesado y relave anuales.



Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos de COCHILCO.

## 2.2 CONTEXTO OPERACIONAL

La Ramayana, es una comunidad ubicada en la región de Valparaíso, en el sector de la cuesta La Dormida, Olmué (Ver figura 2-1). En este sector en los años 30, del presente siglo, existía una mina de oro y cobre, la cual estaba ubicada en la cumbre, la cual generaba relaves por deposición natural. En la zona existen tres relaves generados de la misma mina y por las mismas condiciones.

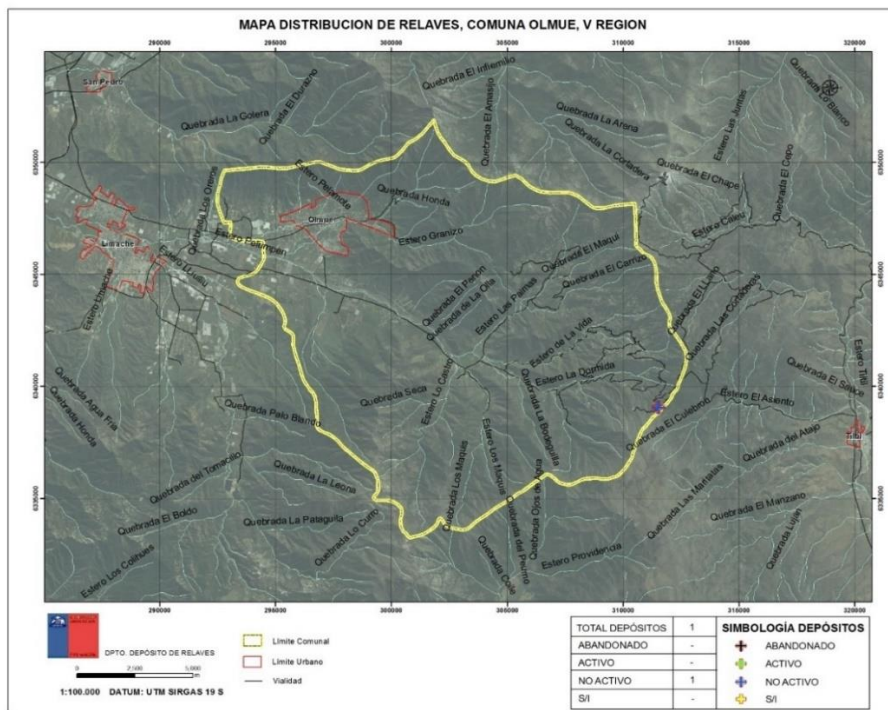


Figura 2-1: Mapa distribución de relaves en la comuna de Olmué, región de Valparaíso

Fuente. SERNAGEMIN.

Los relaves existentes se encuentran expuestos al ambiente, sin recubrimiento ni protección de ningún tipo, emplazados al borde de la carretera y otro en la base del cerro (Ver figura 2-2 y 2-3).



Figura 2-2: Fotografía de relave Ramayana 1.

Fuente. Elaboración propia.



Figura 2-3: Fotografía de relave Ramayana 2.

Fuente. Elaboración propia.

### 2.3 PRUEBAS DE LABORATORIO

Se tomaron muestras del relave denominado Ramayana 1 (Ver figura2-4), las cuales se analizaron en el laboratorio de mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.



Figura 2-4: Fotografía lugar de toma de muestras, Ramayana 2.

Fuente. Elaboración propia.

#### 2.3.1 Análisis granulométrico

La muestra de 1002,6 [g] se pasó por un cortador de rifles a modo de obtener una representatividad y finalmente se trabajó con 620[g] (Ver figura 2-5), los que fueron cargados al tamizador.



Figura 2-5: Fotografía muestra de mineral pasada por cortador de rifles.

Fuente. Elaboración propia.

La muestra se cargó en el tamizador y mantuvo ahí durante 5[ $\text{min}$ ] con una amplitud de 50 [Hz] (Ver figura 2-6). Luego de ello se realizó el masaje de cada tamiz para obtener la masa retenida por cada uno de ellos.



Figura 2-6: Fotografía tamizador empleado para el análisis granulométrico.

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 2-1: Análisis granulométrico antes de molienda.

TAMIZ			Mineral + tamiz [g]	Masa mineral [gr]
N°	Masa [g]	Abertura [ $\mu\text{m}$ ]		
10	689,7	2000	791,6	101,9
40	575,9	425	843,8	267,9
100	331,2	150	555,9	224,7
140	324,8	106	337,0	12,2
170	311,0	90	312,1	1,1
200	326,2	75	327,7	1,5
270	313,0	53	314,8	1,8
400	308,4	38	308,7	0,3
Fondo	485,5	0	485,7	0,2
			<b>Totales</b>	611,6

Fuente: Elaboración propia.

Luego de realizar este tamizaje la muestra se llevó al molino de bolas durante 5[ $\text{min}$ ] para conminuir la y volver a tamizarla (Ver tabla 2-2).

Tabla 2-2: Análisis granulométrico después de molienda.

TAMIZ			Mineral + tamiz [g]	Masa mineral [gr]
N°	Masa [g]	Abertura [ $\mu\text{m}$ ]		
40	575,9	425	887,8	311,9
100	331,2	150	517,2	186,0
140	324,8	106	372,1	47,3
170	311,0	90	311,1	0,1
200	326,2	75	326,6	0,4
270	313,0	53	314,5	1,5
400	308,4	38	308,7	0,3
Fondo	485,5	0	485,9	0,4
			<b>Totales</b>	547,9

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.2 Análisis de flotación

A la celda de flotación neumática son cargados 500 [g] de mineral después de ser molido, con 4[l] de agua destilada. Además, se incorporan 700 [μl] de colector Cerro Negro y la misma cantidad de espumante Aero Float #76E. Se acondiciona la celda de flotación durante 3 [min] antes de comenzar el arrastre del concentrado (Ver figura 2-7).



Figura 2-7: Fotografía celda de flotación durante el acondicionamiento de la muestra.

Fuente. Elaboración propia.

El concentrado se arrastró manualmente con una paleta de acero, depositándolo en una bandeja de aluminio a variados tiempos (Ver figura 2-8). Los concentrados se dejaron en una estufa eléctrica durante una semana a 50[°C] y posteriormente fueron masados (Ver tabla 2-3).



Figura 2-8: Fotografía concentrados a diferentes tiempos de flotación.

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 2-3: Resultados obtenidos de la flotación del relave.

	Masa bandeja [g]	11,1
Tiempo flotación [min]	Masa bandeja + mineral [g]	Masa cobre [g]
0,5	11,8	0,7
1	12,2	1,1
2	13,3	2,2
3	12,5	1,4
5	12,4	1,3
	Total	6,7

Fuente. Elaboración propia.

**CAPÍTULO 3: RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS Y PROPUESTA**  
**ECONÓMICA**

### **3 ANÁLISIS DE DATOS, CÁLCULO DE PARÁMETROS Y PROPUESTA ECONÓMICA.**

Una vez realizado el laboratorio, donde se extraen datos cualitativos y cuantitativos del mineral, es necesario llevar esta información a un modelo matemático con el fin de poder realizar una comparación y clasificación de la muestra de relave.

A partir de las estandarizaciones del levantamiento de datos y la comparación con los parámetros definidos en cada una de las enunciaciones, puede llegar a realizar una propuesta económica de viabilidad para la conveniencia y el diseño de una planta para satisfacer las necesidades de este peculiar mineral.

#### **3.1 ANÁLISIS DE DATOS Y CÁLCULO DE PARÁMETROS**

Los datos obtenidos de las experiencias de laboratorio son modelados matemáticamente según las ecuaciones definidas, además de interpolaciones para determinar los diámetros de las partículas.

##### **3.1.1 Caracterización geotécnica**

Según el análisis granulométrico efectuado se pueden determinar las características del suelo, llevándolo al sistema de clasificación de suelos.

Se analiza el nivel de grueso o fino, a partir de malla #200Ty según parámetros establecidos se determina que la muestra es G (Ver tabla 3-1).

Tabla 3-1: Clasificación en malla #200Ty

#200	Grueso	99,62%	Grueso $\%(G+S) < \% F$	$\%F < 5\%$ $5\% \leq \%F < 12\%$ $\%F \geq 12\%$
	Fino	0,38%	Fino $\%(G+S) > \%F$	

Fuente. Elaboración propia.

Se continua con la determinación de los diámetros (D10, D30 y D60) para luego determinar el Cc y Cu (Ver tabla 3-2).

Tabla 3-2: Clasificación en malla #200Ty

Diámetro de partícula	Tamaño [ $\mu\text{m}$ ]
D10	203,9
D30	353,6
D60	1160,7

Fuente. Elaboración propia.

Implementando las ecuaciones de Allen Hazen, se obtiene que la muestra analizada no está bien gradada (Ver tabla 3-3).

Tabla 3-3: Clasificación en malla #200Ty

Coefficiente	Valor ecuación	Comparativa bien gradada
Cu	5,692496322	$Cu > 4$
Cc	0,52830814	$1 \leq Cc \leq 3$

Fuente. Elaboración propia.

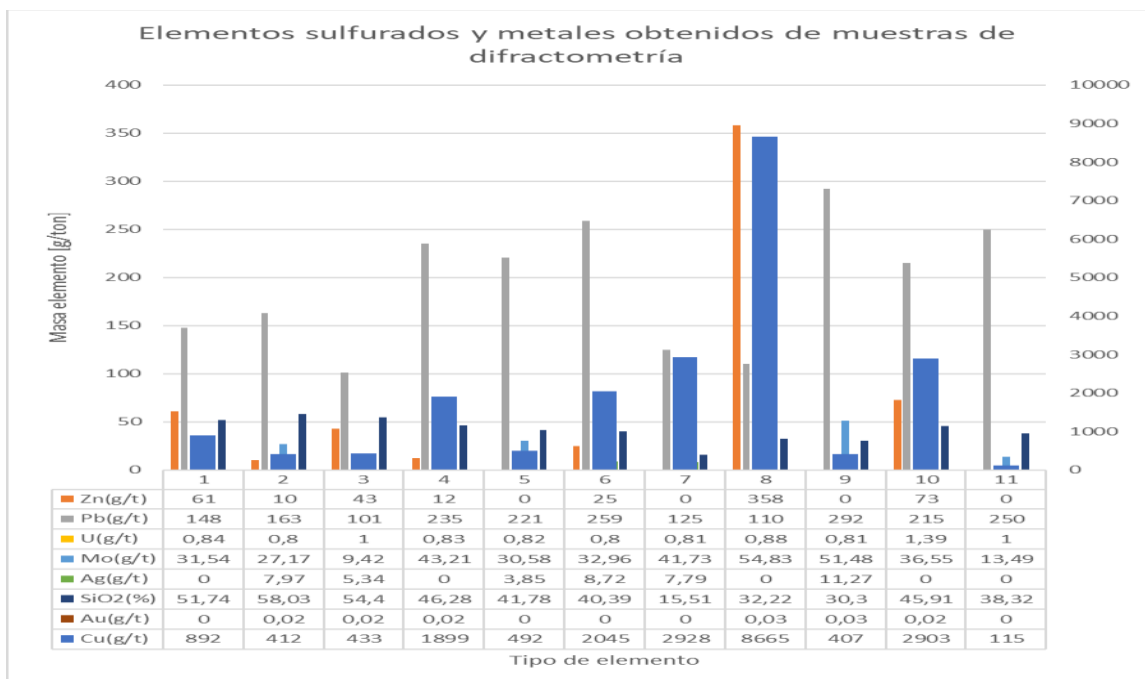
Finalmente se concluye que la muestra de suelo analizada es del tipo grava mal gradada (GP).

### 3.1.2 Caracterización química

SERNAGEMIN, en su labor de tener un catastro nacional de los relaves, ha realizado difracción a una gran cantidad de relaves, cabe señalar que, en este sector de los tres relaves existentes, sólo se pudieron analizar las muestras de un relave.

La difracción muestra una gran versatilidad de minerales dignos de interés, este relave está rotulado como un relave de oro, pero dentro de sus componentes tiene una versatilidad muy amplia de elementos y compuestos. Un extracto de este análisis se muestra (Ver gráfico 3-1), poniendo como primer compuesto al cobre, acompañado de sílice y molibdeno.

Gráfico 3-1: Levantamiento de datos de difracción, escala secundaria para cobre.



Fuente. Elaboración propia, con datos obtenidos de difracción de SERNAGEOMIN.

### 3.1.3 Caracterización metalúrgica

Tamizaje, la muestra pasó por dos análisis granulométricos, el primero antes (Ver tabla 3-4) y el segundo después de molienda (Ver tabla 3-5), en base a estos resultados se calcularon los porcentajes retenido, retenido acumulado y pasante acumulado, con el fin de realizar curvas granulométricas y sus linealizaciones logarítmicas (Ver gráfico 3-2, 3-3, 3-4 y 3-5) para determinar el F80 y P80.

Tabla 3-4: Análisis granulométrico antes de molienda

Tamiz			Masa mineral [g]	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante
N°	Masa [g]	Abertura [µm]				100,00%
10	689,7	2000	101,9	16,66%	16,66%	83,34%
40	575,9	425	267,9	43,80%	60,46%	39,54%
100	331,2	150	224,7	36,74%	97,20%	2,80%
140	324,8	106	12,2	1,99%	99,20%	0,80%
170	311,0	90	1,1	0,18%	99,38%	0,62%
200	326,2	75	1,5	0,25%	99,62%	0,38%
270	313,0	53	1,8	0,29%	99,92%	0,08%
400	308,4	38	0,3	0,05%	99,97%	0,03%
Fondo	485,5	0	0,2	0,03%	100,00%	0,00%
Total			611,6	100,00%		

Fuente. Elaboración propia.

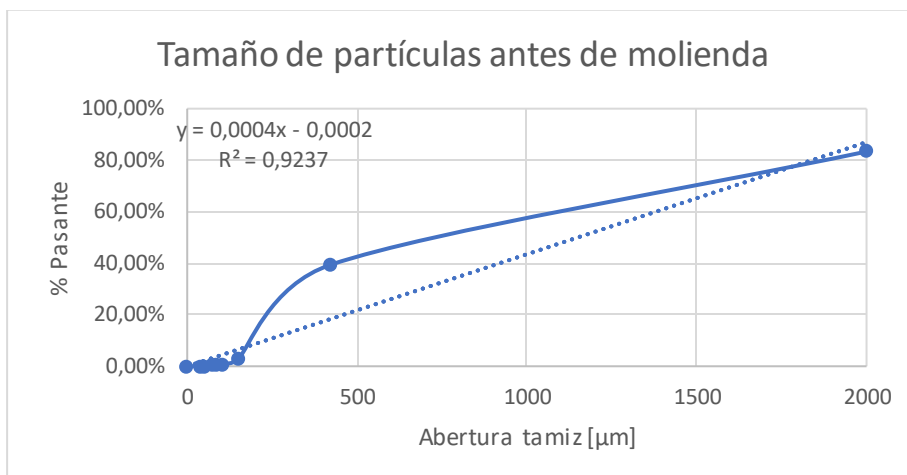
Tabla 3-5: Análisis granulométrico después de molienda

Tamiz			Masa mineral [g]	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante
N°	Masa [g]	Abertura [µm]				100,00%
40	575,9	425	311,9	56,93%	56,93%	43,07%
100	331,2	150	186,0	33,95%	90,87%	9,13%
140	324,8	106	47,3	8,63%	99,51%	0,49%
170	311,0	90	0,1	0,02%	99,53%	0,47%
200	326,2	75	0,4	0,07%	99,60%	0,40%
270	313,0	53	1,5	0,27%	99,87%	0,13%
400	308,4	38	0,3	0,05%	99,93%	0,07%
Fondo	485,5	0	0,4	0,07%	100,00%	0,00%
Total			547,9	100,00%		

Fuente. Elaboración propia.

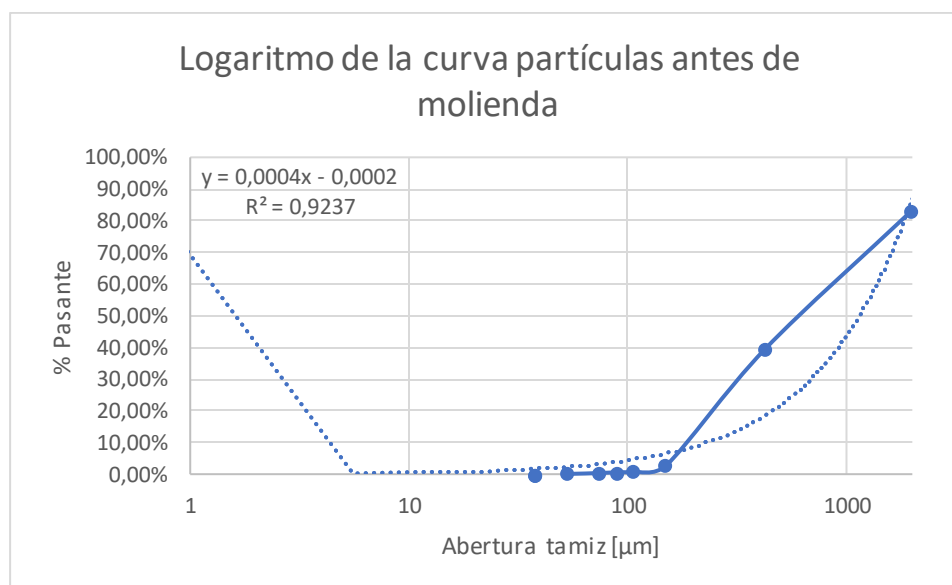
Las tablas muestran que después de la molienda el mineral presenta una disminución en el porcentaje de pasante acumulado, esto es debido a que luego de realizar la molienda el mineral se aglomeró, lo que impidió que este fuese capaz de atravesar los tamices y poder realizar la clasificación de este.

Gráfico 3-2: Análisis granulométrico versus %pasante acumulado antes de molienda



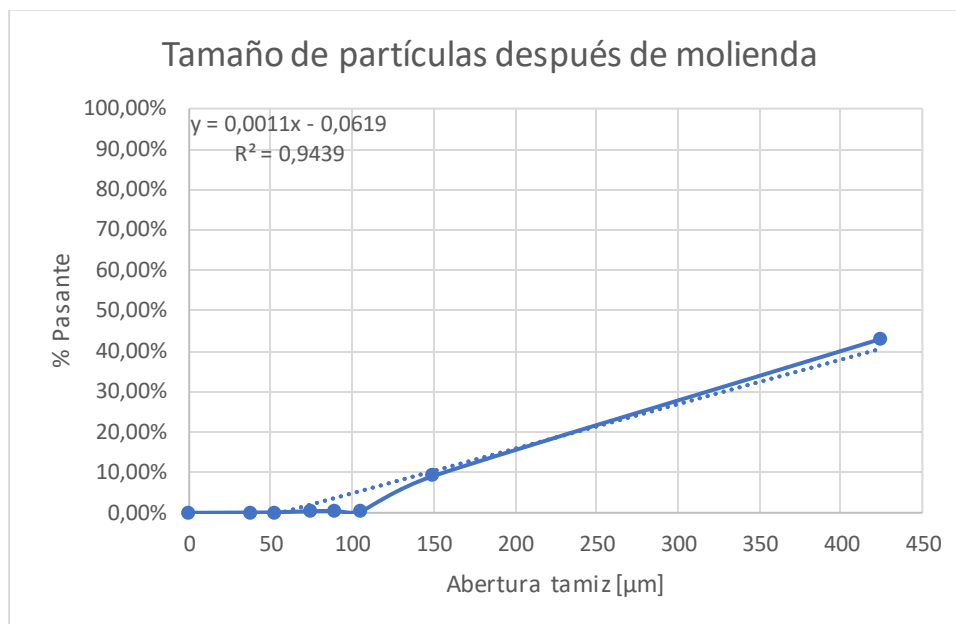
Fuente. Elaboración propia.

Gráfico 3-3: Linealización de análisis granulométrico versus %pasante acumulado antes de molienda



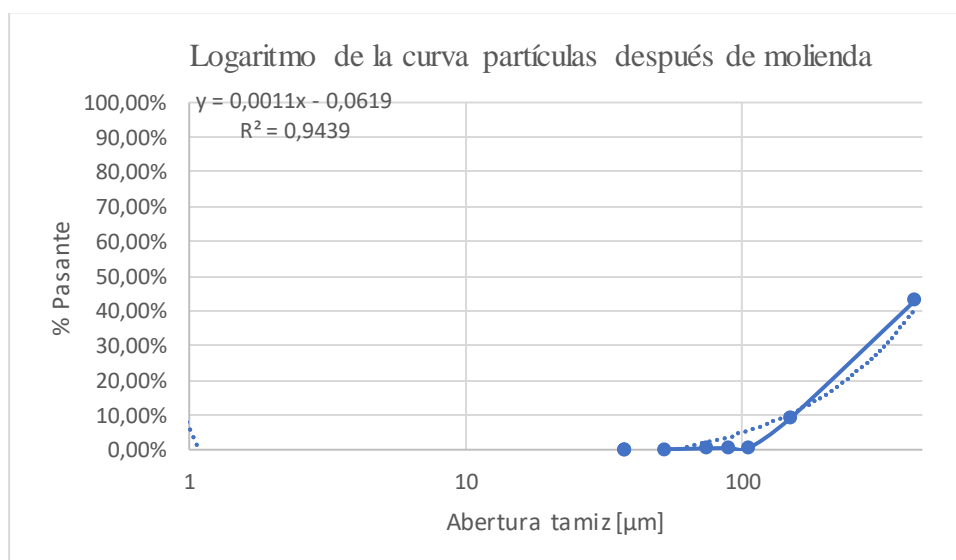
Fuente. Elaboración propia.

Gráfico 3-4: Análisis granulométrico versus %pasante acumulado después de molienda



Fuente. Elaboración propia.

Gráfico 3-5: Linealización de análisis granulométrico versus %pasante acumulado después de molienda



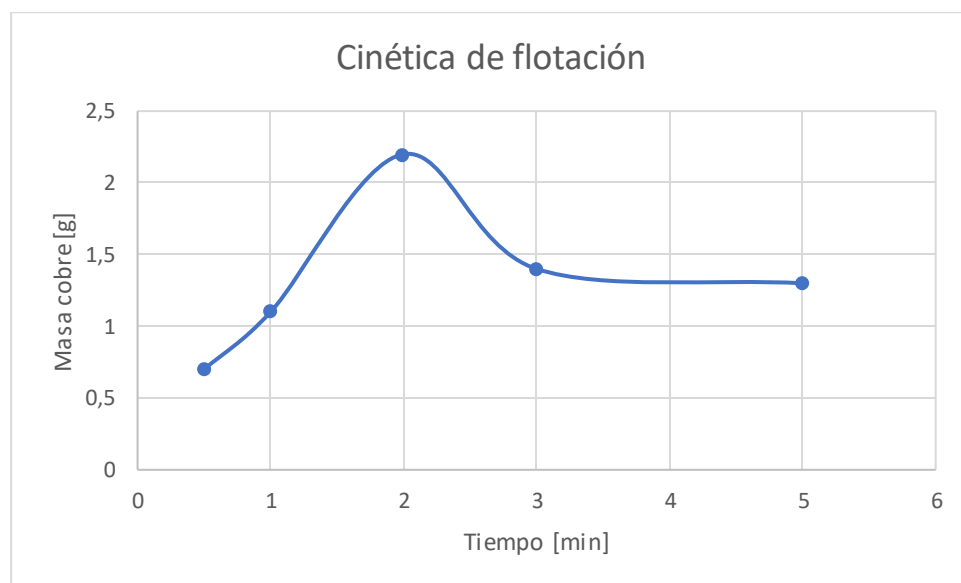
Fuente. Elaboración propia.

Frente a la observación de los gráficos, se aprecia que el mineral no presenta un comportamiento uniforme y sin poder realizar las curvas S, además es imposible determinar el P80, debido a que el mineral no se tamiza, por lo que sólo se obtuvo el F80=1880 [µm], el cual determinará la alimentación para los equipos a utilizar.

#### 3.1.4 Cinética de flotación

Para la cinética de flotación se observa que se consigue una mayor flotación de mineral a los 2 [min] de residencia en la celda neumática y que esta decrece a medida que avanza a los minutos, teniendo un comportamiento de decrecimiento lineal (Ver gráfico 3-5). Con las masas flotadas se calculó la ley de cobre siendo esta de 1,34%.

Gráfico 3-5: Linealización de análisis granulométrico versus %pasante acumulado después de molienda



Fuente. Elaboración propia.

### 3.2 PROPUESTA ECONÓMICA

Se realizó el diseño de una planta virtual a fin de determinar los equipos de trabajo estándar para la conminución y flotación de minerales. Además del consumo energético, eléctrico, que estos equipos tienen para la producción de un determinado nivel de procesamiento.

#### 3.2.1 Prototipo de planta

Para la implementación de esta planta, se consideraron parámetros de producción en torno a la mediana minería, siendo una producción anual de 30.000[ton] de cobre flotado anualmente, con una ley de 1,0% Cu. El total de características para este proceso de determinaron bajo condiciones transversales a nivel nacional (Ver tabla 3-6).

Tabla 3-6: Análisis granulométrico después de molienda

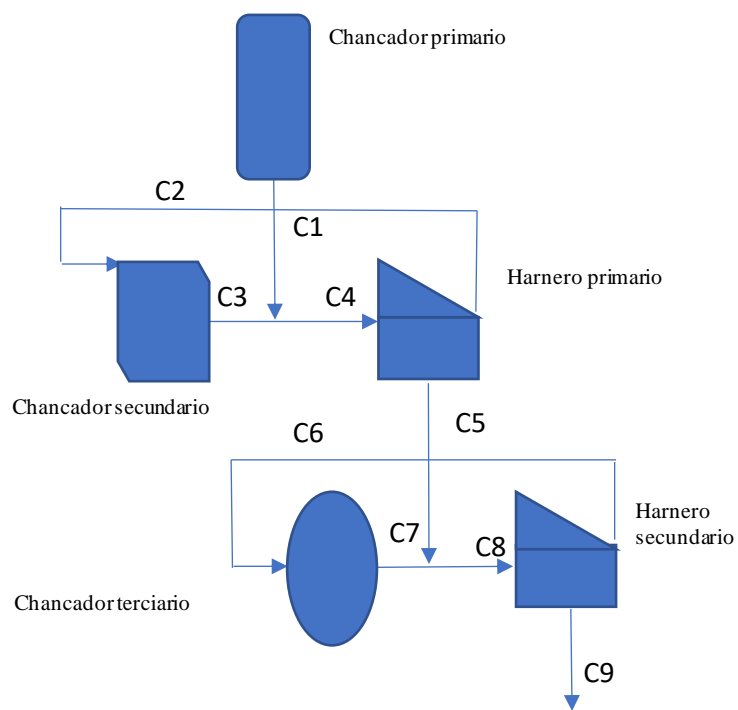
TIPO	SIMBOLOGIA	CANTIDAD	UNIDAD
PRODUCCION	P(Cu)	30.000	[ton/año]
LEY	L(Cu)	1,00%	%
RECUPERACION	R	87%	%
F80	F80	40	[pul]
DIAS DE TRABAJO PLANTA	Dt	290	[dias]
HORAS DE TRABAJO	hr	24	[hr]
DIAS DE TRABAJO	d	7	[dias]

Fuente. Elaboración propia con datos usados de revista de minería.

Frente a este prototipo se diseñó la planta virtual, por medio de selección de equipos que cumpliendo con las cuantificaciones y especificaciones expuestas, se plantea un sistema

cerrado para el chancador primario, mientras que para chancador secundario y terciario, un sistema inverso abierto; esto quiere decir que el mineral que entra al chancador primario, sale de este mismo de forma directa al harnero primario, donde es clasificado y el sobre tamaño es enviado al chancador secundario, mientras que el bajo tamaño es enviado al harnero secundario; a su vez el caudal que se dirige al harnero secundario es clasificado y el sobre tamaño enviado al chancador terciario, mientras que el bajo tamaño pasa al siguiente proceso. Las rocas son transportadas entre los equipos por medio de cintas transportadoras (Ver figura 3-1).

Figura 3-1: Flowsheet representativo del sistema operacional a trabajar, la simbología de C1 a C9 es para representar las cintas transportadoras



Fuente. Elaboración propia con contenido entregados en la asignatura de preparación mecánica, profesor Luis Gutiérrez.

Para satisfacer el modelo antes descrito y las especificaciones expuestas, se comenzó con la búsqueda de chancadores, tanto primario, secundario y terciario, a fin de conminuir el mineral al grado de liberación de la partícula. Continuando bajo el mismo precepto, se determinaron los harneros para la clasificación del mineral (Ver tablas 3-7, 3-8, 3-9, 3-10 y 3-11).

Tabla 3-7: Especificaciones de chancador primario.

<b>ALIMENTACION</b>		<b>619</b>	<b>[ton/hr]</b>
<b>CHANCADOR PRIMARIO</b>			
<b>MANDIBULA</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>UNIDAD</b>	
<b>MODELO</b>	C200		
Tamaño alimentación	1200	[mm]	
Tamaño salida mínimo	175	[mm]	
Tamaño salida máximo	300	[mm]	
Capacidad promedio	831	[ton/hr]	
Potencia promedio	160	[kW/dia]	
Alto	4,22	[m]	
Largo	4,87	[m]	
Ancho	3,89	[m]	
Peso	118,4	[ton]	
Numero chancadores	1	[u]	
Área basal	19	[m^2]	
Consumo energía total	119,15	[kW/dia]	
Consumo energía total	2859,49	[kW/dia]	
Carga efectiva al chancador	619	[ton/hr]	

Fuente. Elaboración propia con datos usados de METSO.

Tabla 3-8: Especificaciones de chancador secundario.

ALIMENTACIÓN		403	[ton/hr]
CHANCADOR SECUNDARIO			
CONO	DESCRIPCION	UNIDAD	
MODELO	HSC160-C1		
Tamaño alimentación	300	[mm]	
Tamaño salida mínimo	22	[mm]	
Tamaño salida máximo	75	[mm]	
Capacidad promedio	205	[ton/hr]	
Potencia promedio	140	[kW/dia]	
Alto	1,875	[m]	
Ancho	1,92	[m]	
Largo	3,195	[m]	
Peso	10,6	[ton]	
Numero chancadores	2	[u]	
Área basal	6	[m <sup>2</sup> ]	
Consumo energía total	275	[kW/dia]	
Consumo energía total	6607,89	[Kw/dia]	
Carga efectiva al chancador	201,5	[ton/hr]	

Fuente. Elaboración propia con datos usados de Great Wall Company.

Tabla 3-9: Especificaciones de chancador terciario.

ALIMENTACIÓN		403	[ton/hr]
<b>CHANCADOR TERCIARIO</b>			
IMPACTO VERTICAL	DESCRIPCION	UNIDAD	
MODELO	MV 90 SOS		
Tamaño alimentación	75	[mm]	
Tamaño salida mínimo	4	[mm]	
Tamaño salida máximo	10	[mm]	
Capacidad promedio	247,4	[ton/hr]	
Potencia promedio	225	[kW/dia]	
Alto	2,632	[m]	
Ancho	4,36	[m]	
Largo	5,006	[m]	
Peso	13,6	[ton]	
Numero chancadores	2	[u]	
Área basal	11	[m <sup>2</sup> ]	
Consumo energía total	367	[kW/dia]	
Consumo energía total	8799,77	[Kw/dia]	
Carga efectiva al chancador	201,5	[ton/hr]	

Fuente. Elaboración propia con datos usados de MEKA.

Tabla 3-10: Especificaciones de harnero primario.

ALIMENTACION	688	[ton/hr]
<b>HARNERO PRIMARIO</b>		
8X24	DESCRIPCION	UNIDAD
MODELO	MHS 2460/3	
Abertura malla	64	[mm]
Capacidad mínima	216	[ton/hr]
Capacidad máxima	1080	[ton/hr]
Capacidad promedio	648	[ton/hr]
Potencia	53	[kW/hr]
Área total de harnado	11	[m <sup>2</sup> ]
Largo	2,438	[m]
Ancho	6,069	[m]
Peso	13,267	[ton]
Numero harneros	1	[u]
Área basal	15	[m <sup>2</sup> ]
Área harnado	44	[m <sup>2</sup> ]
Numero de deck	3	[u]
Consumo energía total	53	[kW/hr]
Consumo energía total	1272	[kW/dia]
Alimentación a cada harnero	689	[ton/hr]

Fuente. Elaboración propia con datos usados de MEKA.

Tabla 3-11: Especificaciones de harnero secundario.

ALIMENTACION	688	[ton/hr]
<b>HARNERO SECUNDARIO</b>		
10X24	DESCRIPCION	UNIDAD
MODELO	MHS 2460/3	
Abertura malla	6	[mm]
Capacidad mínima	216	[ton/hr]
Capacidad máxima	1080	[ton/hr]
Capacidad promedio	648	[ton/hr]
Potencia promedio	53	[kW/hr]
Área total de harneado	21	[m <sup>2</sup> ]
Largo	2,438	[m]
Ancho	6,069	[m]
Peso	13,267	[ton]
Numero harneros	1	[u]
Área basal	15	[m <sup>2</sup> ]
Área harneado	44	[m <sup>2</sup> ]
Numero de deck	3	[u]
Consumo energía total	53	[kW/hr]
Consumo energía total	1272	[kW/dia]
Alimentación a cada harnero	689	[ton/hr]

Fuente. Elaboración propia con datos usados de MEKA.

El consumo energético de la planta se calculó en base al consumo de cada equipo y se usó el valor del kilo watt estándar (Ver tabla 3-12).

Tabla 3-12: Especificaciones de harnero secundario.

<b>CHANCADOR</b>	<b>TIPO</b>	<b>MODELO</b>	<b>CONSUMO ENERGIA [kW/año]</b>
1	MANDIBULA	C200	829253
2	CONO	HSC160-C1	1916287
3	IMPACTO VERTICAL	MV 90 SOS	2551933
<b>HARNERO</b>	<b>TIPO</b>	<b>MODELO</b>	<b>CONSUMO ENERGIA [kW/año]</b>
1	8X24	MHS 2460/3	368880
2	10X24	MHS 2460/3	368880
<b>CONSUMO ENERGIA PLANTA CONMINUCIÓN</b>			
CONSUMO ENERGIA TOTAL [Kw/año]		6035233	
VALOR [kW/hr]		\$144	
COSTO CONSUMO TOTAL		\$869.073.598	

Fuente. Elaboración propia con datos usados de Chilquinta.

Una vez realizada la evaluación de costos energéticos, se pasó a elaborar el plan para molienda y flotación, pero al contrastar los tamaños de alimentación y harneros con el F80, se llegó a la conclusión de que el mineral tratado no necesita chancado ni clasificación por harneros, ya que estos equipos son incapaces de clasificarlo por su tamaño.

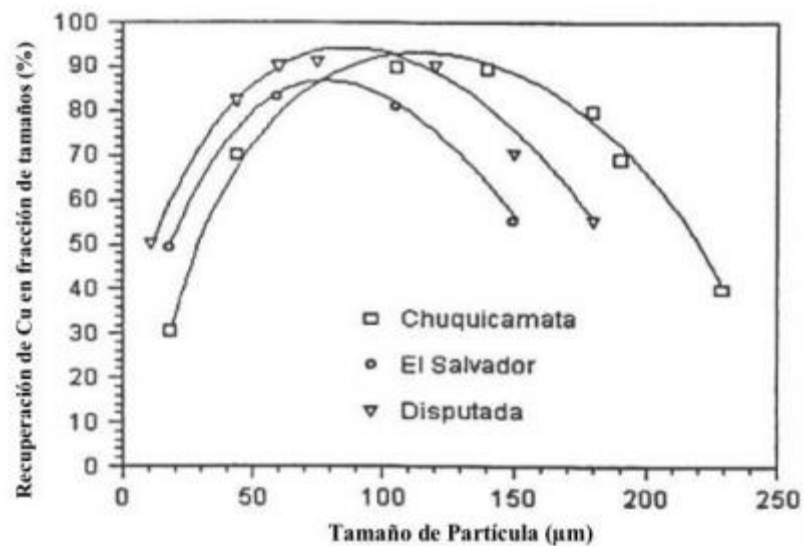
Ante lo anteriormente mencionado se estima una disminución en la compra de chancadores primarios, secundarios y terciarios, además de harneros primarios y secundarios. Siendo también eliminado el consumo energético de estos equipos.

Puesto que el mineral presenta un F80 = 1880 [ $\mu\text{m}$ ] y además es un GP, con un porcentaje de finos de 0,38%, para poder clasificar esta muestra se necesita un hidrociclón de finos y otro de gruesos, será finalmente el hidrociclón el encargado de hacer una primera

clasificación y determinar si el mineral necesita una molienda complementaria o pasará directamente a las celdas de flotación.

Diversos investigadores reportan que una de las variables que tiene mayor impacto en el proceso de flotación es el tamaño de partícula del mineral. En la práctica se ha observado que la eficiencia de la flotación en celdas convencionales disminuye cuando el tamaño de partícula es menor a 38  $\mu\text{m}$  y en el caso opuesto cuando el tamaño de partícula es mayor a 250  $\mu\text{m}$  (Ver Figura 3-2). (Concha & Wasmud)

Figura 3-2: Diagrama de recuperación de tres minas en comparación del tamaño de partícula .

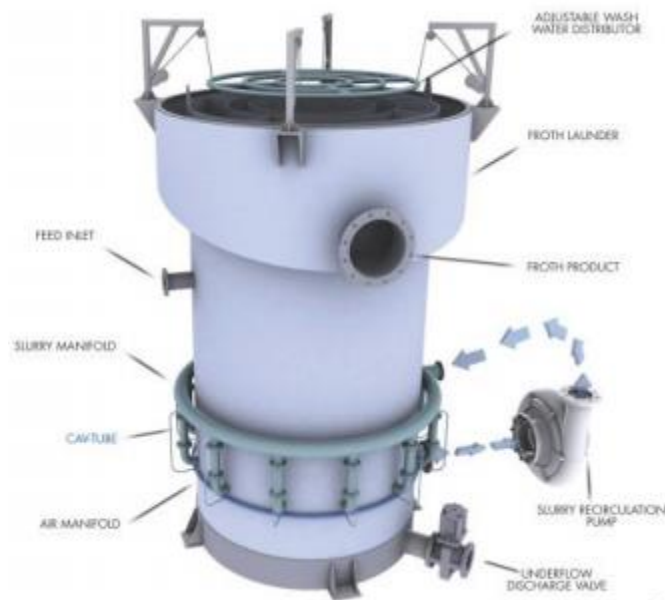


Fuente. Flotación de finos y gruesos aplicado a la recuperación de minerales de cobre. J. Concha y E. Wasmud

Para la flotación de finos, Eriez, desarrollo un sistema de cavitación (Ver figura 3-3), utilizando micro burbujas, las cuales son capaces de captar las partículas finas, con tamaños menores a 30 $[\mu\text{m}]$ . Las pruebas realizadas con esta celda aumentan en dos

puntos porcentuales la cantidad de mineral flotado, además disminuyen el tiempo de residencia a la mitad y disminuyen el consumo de colector hasta en un 90%.

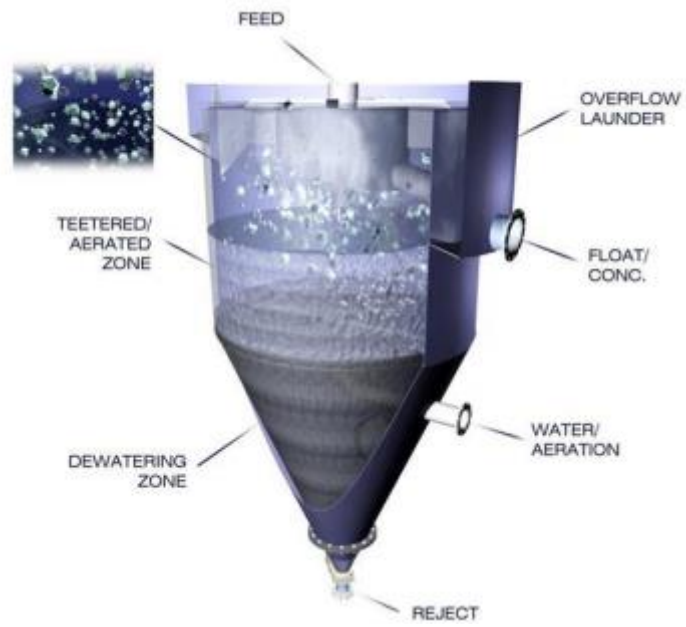
Figura 3-3: Columna Eriez con sistema de cavitación.



Fuente. Flotación de finos y gruesos aplicado a la recuperación de minerales de cobre. J. Concha y E. Wasmud.

En cuando a la flotación de gruesos, partículas mayores a 250[ $\mu\text{m}$ ], es posible evaluar el uso de la celda HydroFloat Eriez, la cual trabaja con la densidad aparente de las partículas, flotándolas con pulsos de aguas fluidizadas y microburbujas (Ver figura 3-4). Las pruebas realizadas con esta celda han flotado partículas de hasta 3000[ $\mu\text{m}$ ], disminución del consumo de colector entre un 10 a 40%, disminución en el uso de aire de hasta un 90% y es capaz de trabajar con pulpas de mineral entre un 40 a 80% de sólidos lo que conlleva a la disminución del uso de agua.

Figura 3-4: Celda Hydrofloat Eriez



Fuente. Flotación de finos y gruesos aplicado a la recuperación de minerales de cobre. J. Concha y E. Wasmud

## **RECOMENDACIONES**

Antes de realizar cualquier tipo de procedimiento al mineral, es necesario categorizar todos los puntos de los parámetros de características geotécnicas, con el fin de estipular si es factible mover el mineral de donde se encuentra depositado.

En caso de necesitar aumentar el grado de liberación de la partícula, es necesario secarlo antes de conminuirlo, ya que al momento de molerlo presenta aglomeraciones, lo que aumenta el tiempo de acondicionamiento dentro de la celda, además de generar un problema al clasificar.

Es necesario usar al menos dos tipos de hidrociclones para la clasificación uno de finos y otro de gruesos, puesto que al ser un suelo mal gradado, presenta una amplia versatilidad de tamaños.

Para la flotación de finos se recomienda el uso de la celda Eriez de cavitación, ya que una celda convencional tendría que disminuir sus rpm en más del 10%, produciendo problemas de sedimentación. En tanto a los gruesos, se recomienda la celda Eries Hydrofloat, ya que el aumento de las rpm en un 20% para una celda convencional produciría turbulencia y ruptura de las burbujas.

Se recomienda realizar un proceso previo a la muestra con el fin de recuperar metales pesados presente dentro de los minerales y alguna técnica secundaria después de la flotación para la recuperación de las denominadas tierras raras, ya que la diversidad mineralógica del relave es atractiva.

## CONCLUSIONES

Este trabajo se propuso revalorizar los relaves mineros como una fuente de suministro de materia prima para el procesamiento de minerales, lo cual se cumplió a cabalidad, ya que se entregaron las técnicas necesarias para trabajar con este tipo de materia prima y los aspectos a considerar para la realización de una planta procesadora acorde a las características evaluadas dentro del informe.

Los objetivos propuestos se cumplieron, debido a que se desarrollaron cada uno de ellos en forma minuciosa, entregando parámetros accesibles y demostrando con pruebas empíricas la realización de la recuperación de cobre desde un relave.

Considerando el trabajo realizado dentro de esta tesis, es esperable que se necesiten poner a prueba las técnicas mencionadas aquí y que se requiera utilizar la tecnología recomendada puesto que la materia prima con la que se plantea trabajar no es un mineral convencional y este contiene compuestos adicionales a los encontrados en una mina; aunque la ley de cobre de la materia prima presentada es de 1,3% similar a la utilizada en la minería actualmente.

Finalmente, la propuesta económica implementada no tuvo los resultados comparativos, ya que las características de la materia prima se salían de los rangos estipulados de trabajo, pero sirve como base para determinar los ahorros en equipos y consumo eléctrico de la planta de chancado, ya que esta no sería necesaria por las características del mineral.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Concha, J., & Wasmud, E. (s.f.). Flotación de finos y gruesos aplicado a la recuperación de minerales de cobre.
2. Das, B. M. (1999). Fundamentos de la ingeniería geotécnica.
3. Gibbs, J. (1873). "Un método de representación geométrica de las propiedades termodinámicas de sustancias por medio de superficies".
4. Youd. (2001). Metodología de Seed and Idriss.
5. Suarez, G. & García, E.& Amariz, J. (2005). Flotación de columna como técnica de beneficio para minerales finos.
6. (S/A). (2004-2005). Métodos difractométricos. Aplicación de química inorgánica, parte 2, técnicas estructurales.
7. Gutiérrez, L. (2019). Preparación mecánica de minerales.
8. Álvarez, C. (2020). Concentración de minerales.
9. Sernageomin. <http://sernageomin.cl/>. Difractometría y mapas.
10. Cochilco. <https://www.cochilco.cl/Paginas/Inicio.aspx>. Catastro nacional de producción de cobre.

